



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV**

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

**ZÁSOBNÍK TEPLA SOLÁRNÍ SOUSTAVY**

SOLAR HOT WATER STORAGE TANK

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Karolína Vyhlídalová

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR HORÁK, Ph.D.

**BRNO 2020**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	P3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Doktorský studijní program s kombinovanou formou studia
<b>Studijní obor</b>	3608V001 Pozemní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav technických zařízení budov

## ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

<b>Student</b>	Ing. Karolína Vyhlídalová
<b>Název</b>	Zásobník tepla solární soustavy
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Petr Horák, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	
<b>Datum odevzdání</b>	V termínech určených časovým harmonogramem akademického roku, nejpozději do jednoho roku od data zadání disertační práce
<b>V Brně dne</b>	

---

prof. Ing. Jiří Hirš, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

## STRUKTURA DISERTAČNÍ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

doc. Ing. Petr Horák, Ph.D.

Vedoucí disertační práce

## ABSTRAKT

Solární zásobník tepla představuje důležitý prvek solární soustavy. Umožňuje akumulaci přeměněné energie, a tím překrývá rozdíly mezi dodávkou a odběrem tepla mezi solární soustavou a odběrným místem. Vhodný návrh zásobníku je klíčový pro efektivní provoz a účinnost celé solární soustavy. Svou velikostí stanovuje množství využitelné energie a vlastní tepelné ztráty. Návrh solárního zásobníku vychází ze tří hypotéz. Solární pokrytí potřeby tepla, poměr akumulační kapacity zásobníku vzhledem ke kolektorové ploše a předpokladu, že objem solárního zásobníku odpovídá 1 - 2 násobné potřebě teplé vody. Smyslem této disertační práce je rozvinout poznání v oblasti navrhování solárních zásobníků tepla. Klade si za cíl stanovit pravidla pro návrh solárního zásobníku s pomocí numerického modelování a vycházejících z exaktních postupů založených na experimentálním měření a obecných výpočtech. Rovněž je zaměřena na ověření platnosti uvedených hypotéz a následného vyvození patřičných závěrů pro praxi a další možný výzkum. Numerický model obsahuje tři proměnné parametry, a to akumulační objem solárního zásobníku, plochu solárních kolektorů a počet uživatelů. Smyslem simulací je najít vzájemnou závislost těchto tří parametrů a na základě vzájemného ovlivnění, následně upravit návrh solárního zásobníku s ohledem k potřebě uživatele.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Solární soustava, solární zásobník, příprava teplé vody, simulace, validace modelu, verifikace modelu, TRNSYS, solární termické kolektory

## ABSTRACT

The solar hot water storage tank is of great importance in the solar collector array. It allows transformed energy accumulation thus deals with the inconsistency between supply and demand. The suitable design of the storage tank can improve system efficiency. The storage capacity represents the balance between the amount of stored hot water and the tank's heat losses. The design of the storage capacity is based on three hypotheses. The coverage of hot water demand by solar energy, the ratio between storage capacity and solar thermal collector area and the prediction that the storage capacity corresponds to one- to twofold hot water demand. The purpose of this thesis is to share an understanding of the solar storage tanks design and to improve the design through numerical simulation, experimentations and general calculations. It also focuses on the confirmation of the used hypotheses and determination of the best way to design the solar storage tank for general practice and further potential discussions. The simulation model has three variables – the storage capacity, collector area and the number of occupants. The intent is to find the interdependence of these three variables. The purpose of the simulations is to modify the design of the solar tank based on the mutual influence of studied parameters. The modifications are performed based on the users' needs.

## KEYWORDS

Solar collector array, solar storage tank, domestic hot water preparation, simulation, model validation, model verification, TRNSYS, solar thermal collectors

## Bibliografická citace

Ing. Karolína Vyhlídalová *Zásobník tepla solární soustavy*. Brno, 2019. 82 s., 30 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov.  
Vedoucí práce doc. Ing. Petr Horák, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Zásobník tepla solární soustavy zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29. 11. 2019

---

Ing. Karolína Vyhlídalová  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala celé své rodině za jejich neutuchající podporu a důvěru, svým přátelům za jejich pozitivní přístup a svému vedoucímu disertační práce za jeho konstruktivní kritiku, cenné rady a připomínky v průběhu mého studia a kompletování práce.

---

Ing. Karolína Vyhliďalová

# OBSAH

ÚVOD.....	10
1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....	12
1.1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY VE SVĚTĚ .....	13
1.2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY V ČR.....	14
1.3 SOLÁRNÍ ZÁSOBNÍK TEPLA.....	15
1.3.1 Tepelné ztráty zásobníku.....	15
1.3.2 Ohřev teplé vody .....	17
1.3.3 Odběr teplé vody .....	17
1.3.4 Odběrový diagram.....	18
1.3.5 Rozvody potrubí - součinitel prostupu tepla potrubí.....	19
1.3.6 Tepelné ztráty rozvodů teplé vody .....	20
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	22
3 METODY ŘEŠENÍ.....	23
3.1 EXPERIMENTÁLNÍ ŘEŠENÍ .....	23
3.1.1 Měřená sestava .....	23
3.1.2 Metoda měření.....	24
3.1.3 Měřicí technika .....	25
3.1.4 Využití experimentálního měření pro validaci modelu .....	26
3.2 ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ .....	30
3.2.1 Metoda výpočtu .....	30
3.2.2 Solární podíl.....	31
3.3 SIMULAČNÍ ŘEŠENÍ .....	33
3.3.1 Simulační software TRNSYS.....	33
3.3.2 Model solární soustavy .....	33
3.3.3 Návrhové parametry .....	48
4 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE .....	51
4.1 ROZSAH SIMULAČNÍHO ŘEŠENÍ .....	51
4.2 SOLÁRNÍ POKRYTÍ .....	52
4.3 PODÍL SOLÁRNÍCH ZISKŮ Z CELKOVÉ POTŘEBY .....	53
4.4 TEPELNÁ BILANCE ZÁSOBNÍKU TEPLA .....	55
4.5 TEPELNÁ ZTRÁTA VZTAŽENÁ NA 1 LITR OBJEMU SOLÁRNÍHO ZÁSOBNÍKU .....	57



4.6	TEPELNÉ ZTRÁTY VZTAŽENY NA 1 LITR OBJEMU ZÁSOBNÍKU A 1 M <sup>2</sup> KOLEKTOROVÉ PLOCHY .....	59
4.7	TEPLOTA KAPALINY V ZÁSOBNÍKU .....	61
	ZÁVĚR .....	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	67
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	77
	SEZNAM GRAFŮ .....	79
	SEZNAM TABULEK .....	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	82

## ÚVOD

Dvacáté první století přináší významné změny v životním stylu lidstva. Charakterizované bouřlivým vývojem na poli vědy a techniky. Moderní věda neustále získává nové poznatky v nejrůznějších oborech, které jsou úspěšně transponovány do běžného života. Ovšem na rozdíl od předešlých století je důraz kladen na ekologii. Současným trendem je návrat k přírodě a využívání zdrojů obnovitelných s ohledem na ochranu životního prostředí.

Ochrana životního prostředí, úspora energií a využívání alternativních a převážně pak obnovitelných zdrojů tepla, představují charakteristické atributy moderních systémů a soustav technických zařízení budov. Nároky na komfort bydlení se zvyšují, přesto je cílem snížení celkových provozních nákladů, z důvodu zachování primárních zdrojů energie. Tepelné ztráty samotného objektu i jednotlivých technologických systému představují jeden z faktorů ovlivňující potřebné množství tepla. Dalším z faktorů je bezesporu účinnost použitých technologických zařízení. Odpovědí korporací, firem a výzkumných center na tento nový trend, je vývoj a výroba nových technologií, materiálů, systémů i postupů.

V tomto směru vývoje a užívání úsporných technologií, zastupují systémy využívající solární energii veřejně dostupné řešení. V technickém zařízení budov je solární energie využívána převážně aktivně s pomocí termických solárních soustav a v nemalé míře i s pomocí fotovoltaických soustav. Novou kapitolou je pak využívání solárních zisků pasivně, dosažením vhodného návrhu obálky budovy. Popřípadě systémy hybridní, které aktivní a pasivní využití solárních zisků kombinují. Důležitou roli u termických solárních soustav hraje kromě vlastního solárního kolektoru také zásobník ohřívané kapaliny. Solární zásobník umožňuje akumulaci přeměněné energie, a tím překrývá rozdíly mezi dodávkou a odběrem tepla mezi solární soustavou a odběrným místem. Vhodný návrh zásobníku je klíčový pro efektivní provoz a účinnost celé solární soustavy. Svou velikostí stanovuje množství využitelné energie a vlastní tepelné ztráty. Ačkoliv v oblasti vývoje solárních kolektorů je úroveň současného poznání na velmi vysoké úrovni, návrh samotného solárního zásobníku tepla vychází převážně z empirických poznatků.

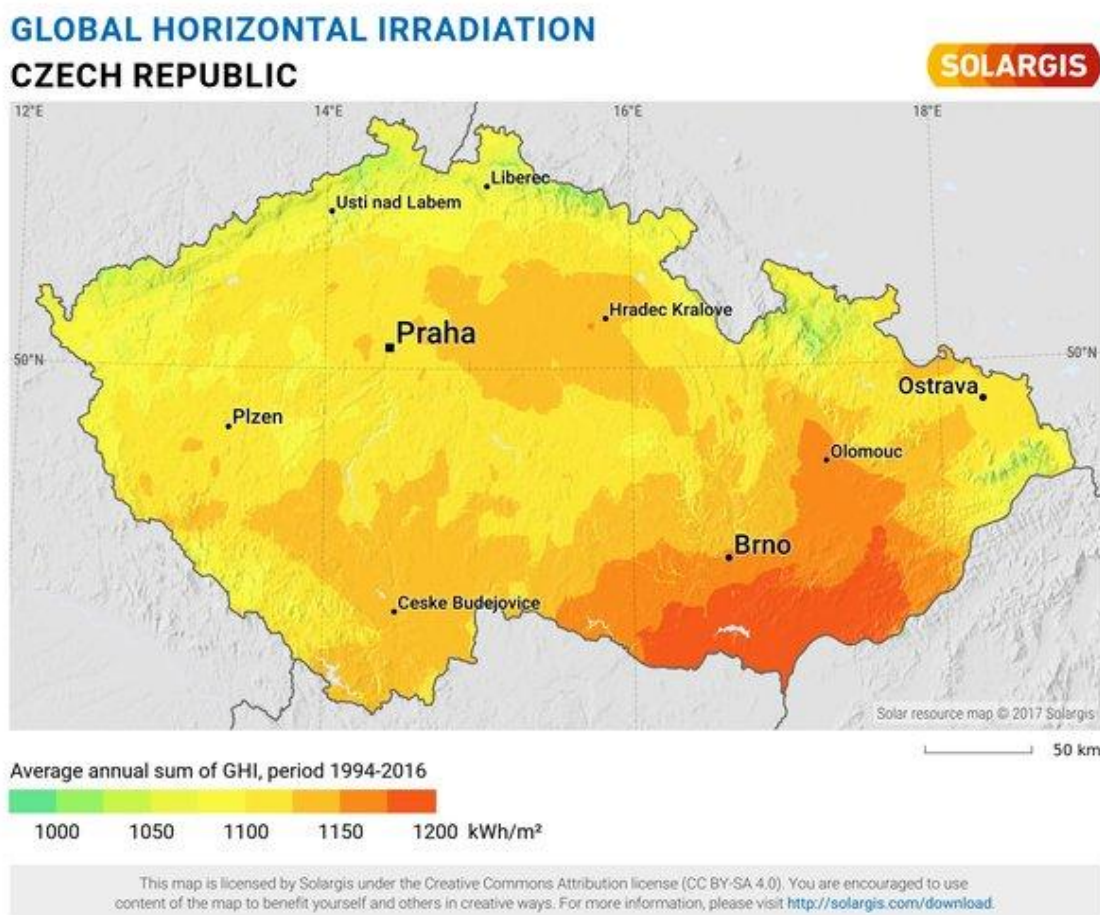
V současné době máme k dispozici poměrně rozsáhlou nabídku simulačních softwarů pro energetické hodnocení budov i pro hodnocení solárních soustav. Příkladem některých softwarů pro energetické hodnocení budov jsou software Building simulation (BSim) vytvořen výzkumným institutem v Dánsku [1] a software Energie z balíku programů Stavební fyzika české firmy K-CAD spol. s.r.o. [2]. Solární soustavy pak mohou být přesněji hodnoceny pomocí softwaru Transient Systems Simulation (TRNSYS) vytvořeným odborníky ze Spojených států amerických [3] nebo pomocí softwaru T\*SOL nabízeným anglickou firmou The Solar Design Company [4]. Každý z těchto softwarů vychází z odlišných principů návrhu a výpočtů. Projekční praxe využívá pro návrh solárních zásobníků tepla převážně následující tři hypotézy:

- První hypotézou je procentuální pokrytí potřeby tepla solární energií. Pro rodinné domy by se měla pohybovat okolo 50 - 70 % [5][6]. Nižší pokrytí je v rámci investice neekonomické a vyšší může způsobovat přehřátí teplotnosné kapaliny v systému.
- Druhá hypotéza je zaměřena na poměr akumulační kapacity zásobníku vzhledem ke kolektorové ploše. Ideální poměr pro návrh solárního zásobníku uvedený výrobcí a odborníky je stanoven v rozmezí 50 - 80 l/m<sup>2</sup> [5].
- Třetí hypotéza vychází z potřeby tepla pro ohřev teplé vody, vytápění objektu, ohřev bazénové vody nebo kombinace výše zmíněných. Pro solární ohřev teplé vody se vychází z předpokladu, že objem solárního zásobníku odpovídá 1 - 2 násobné potřeby teplé vody [5].

Smyslem této disertační práce je rozvinout poznání v oblasti navrhování solárních zásobníků tepla. Klade si za cíl stanovit pravidla pro návrh solárního zásobníku s pomocí numerického modelování v simulačním softwaru a vycházejících z exaktních postupů založených na experimentálním měření a obecných výpočtech. Rovněž je zaměřena na ověření platnosti uvedených hypotéz a následného vyvození patřičných závěrů pro praxi a další možný výzkum. Numerický model bude obsahovat tři proměnné parametry, a to akumulační objem solárního zásobníku, plochu solárních kolektorů a počet uživatelů. Smyslem simulací je najít vzájemnou závislost těchto tří parametrů a na základě vzájemného ovlivnění, následně upravit návrh solárního zásobníku s ohledem k potřebě uživatele.

# 1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Sluneční konstanta, která představuje střední roční tok sluneční energie dopadající na vnější povrch zemské atmosféry, má hodnotu  $1367 \text{ W/m}^2$  [7]. Množství solárního záření dopadajícího na zemský povrch závisí na lokalitě, ročního období, času a počasí. Solární energie je jako zdroj tedy energie nestálá a proměnná. Z tohoto důvodu se teplo přeměněné z dopadající solární energie ukládá v solárních zásobnících tepla.



Obr. 1.1-1: Globální solární záření dopadající na území České republiky [8]

Jedním z dostupných zásobníků na trhu je akumulční stratifikační zásobník. Ten umožňuje odebrání požadované teploty vody pomocí jednotlivých stratifikačních úrovní (úložných vrstev), a tudíž zvyšuje účinnost celého systému. Dalšími druhy jsou homogenní zásobník a opláštěný zásobník. Plášť opláštěného zásobníku představuje tepelný výměník. Teplo ze solárních kolektorů je vedeno do plášťového tepelného výměníku, který následně předá teplo kapalině v samotném zásobníku.

Vědci a odborníci v České republice i ve světě zkoumají a testují nové i stávající zásobníky tepla. Upravují jejich parametry a konstrukční řešení, pomocí dlouhodobého pozorování, experimentování i simulačních řešení.

## 1.1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY VE SVĚTĚ

Výzkumy solárních zásobníků tepla vedené zahraničními vědci a odborníky jsou rozsáhlé. Představují testování různých materiálů a akumulačních hmot, porovnávají rozdílné konstrukční řešení, optimalizace solárních systému pro potřeby uživatelů. Hledají nové a lepší způsoby akumulace tepla pro pozdější využití. Způsoby zvýšení účinnosti solárních systémů a snížení provozních i pořizovacích nákladů.

Své poznatky a nabyté vědomosti prezentují a shrnují v odborných člancích a publikacích. Pinel et al. [9] sestavili souhrn sezónního ukládání termální solární energie vzhledem k druhu ukládaného tepla, typu solárních zásobníků tepla a konstrukčního řešení. Dincer a Dost [10] popsali ve svém článku různé varianty zásobníků tepla a vyhodnotili je z hlediska využití, ceny, složitosti instalace apod. Popisují zde i tři hlavní faktory ovlivňující návrh objemu zásobníku tepla. Prvním faktorem je pořizovací cena solárního systému. Druhým faktorem je vliv objemu zásobníku tepla na účinnost celého solárního systému. Posledním hlavním faktorem jsou tepelné ztráty zásobníku tepla. Zásobníky pracující s citelným teplem a zásobníky pracující s vázaným teplem jsou rozebrány v článku od Fatha [11].

Li et al. [12] a Shah a Furbo [13] zkoumali vliv vody vstupující do zásobníku na teplotním členění (stratifikaci) zásobníku tepla v závislosti na použitém typu vstupního otvoru. Kenjo et al. [14] vytvořili model pro testování vlivu rychlosti proudění přiváděné kapaliny na stratifikaci zásobníku. Z měření vyplynulo, že snížení rychlosti proudění vody zhruba sedmkrát zlepší stratifikační členění v zásobníku tepla a tudíž zvýší účinnost celého termálního systému. Bivalentní zásobník tepla je rozebrán v článku od Furba et al. [15]. Z hodnocení tohoto typu zásobníku tepla vyplynulo, že díky druhému zdroji tepla je výhodný pro případy, kdy množství teplé vody odebrané uživateli není známo, je proměnné, příliš malé nebo příliš velké. Shin et al. [16] vytvořili studii pojednávající o vlivu konstrukčního řešení zásobníku na jeho účinnost. Výslednou účinnost ovlivňuje i rychlost proudění, počáteční teplota a proces nabíjení a vybíjení. Furbo a Knudsen [17] hledali způsoby zlepšení zásobníku s plášťovým výměníkem tepla, jež je dostupný na trhu. Zjistili, že daný typ zásobníku může být vylepšen jednoduchými úpravami. Zvětšením plochy pláště zásobníku, snížením výšky výměníku, použitím silnější vrstvy izolace a změnou z ocelového pláště za nerezový. Dehghan a Barzegar [18] zkoumali chování solárního zásobníku tepla během odběru teplé vody.

Li et al [19] využili energetický simulační software TRNSYS pro testování různých variant solárního systému. Prostřednictvím provedených simulací došli ke zjištění, že pozice výměníku tepla v zásobníku značně ovlivňuje jeho účinnost. Nejvýhodnější pro nabíjení zásobníku tepla byla varianta s umístěním výměníku v nejnižší úrovni zásobníku. S rostoucí pozicí výměníku klesala účinnost nabíjení zásobníku i termálních kolektorů.

Knudsen [20] provedl výzkum k určení nejvýhodnějšího objemu solárního zásobníku tepla pro dánské a řecké podmínky. Vycházel z potřeby teplé vody 100 l/den. Jeho výzkum došel k závěru, že ideální objem zásobníku z energetického hlediska je 150 l. Nejčastěji volené a instalované zásobníky tepla jsou o objemu 200 l a 300 l. Vzhledem k běžné potřebě teplé vody do 200 l/den, jež byla stanovena průzkumem denní potřeby teplé vody jednogeneračních rodinných domů v Dánsku, byl určen ideální objem zásobníku teplé vody v rozmezí 100 - 175 l.

Energy saver [21], výzkumné středisko ze Spojených států amerických, se zabývá úsporou energií a využitím obnovitelných zdrojů. Návrh akumulační kapacity solárního zásobníku pro ohřevu teplé vody určují podle počtu uživatelů. Systémům obsluhujícím 1 až 3 osoby navrhuje jako dostačující zásobník o objemu 200 l až 250 l. Středně velký zásobník o objemu 300 l pro systémy se 3 až 4 uživateli a zásobník o objemu přesahujícím 300 l pro 4 až 6 osob. Pro efektivní návrh stanovují přibližně 60 l objemu zásobníku na 1 m<sup>2</sup> kolektorové plochy a 80 l/m<sup>2</sup> kolektorové plochy při předpokládaných vysokých solárních ziscích. Tento postup je navržen ve snaze limitovat možné přehřívání solárního systému při nižším odběru teplé vody.

## 1.2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY V ČR

Cihelka [22] napsal mimo jiné knihu shrnující poznatky o energii ze solárního záření. V knize se nejen dočteme o solární energii jako takové, ale také o systémech, které jsou schopny danou obnovitelnou energii využívat. Nabízí výpočty, tabulky a grafy pro návrh jednotlivých částí systémů a ukázkové příklady.

Solárními systémy a zásobníky tepla se zabývají Kramoliš a Matuška. Kramoliš [23] publikoval článek popisující jednotlivé typy solárních zásobníků tepla a jejich obecný popis. Komentuje zde návrh zásobníku tepla jako kompromis mezi energetickým a ekonomickým řešením. Podle Matušky [24] je správný návrh solárního zásobníku kritický pro pokrytí požadované potřeby tepla. Navrhuje objem solárního zásobníku tepla pro běžnou potřebu teplé vody 30 - 50 l/(osden) a celkovou plochu solárních kolektorů 4 - 6 m<sup>2</sup> v rozmezí 200 - 300 l [25]. V jiné ze svých publikací pro stejnou potřebu teplé vody a celkovou plochu solárních kolektorů 2 - 6 m<sup>2</sup> navrhuje objem solárního zásobníku tepla v rozmezí 200 - 500 l [26].

Výrobci solárních sestav uvádí v projekčních podkladech tzv. nepsaná pravidla dimenzování akumulačních zásobníků [5]. Solární ohřev teplé vody pro jedno- a dvougenerační rodinné domy stanovuje jako 1 - 1,5 m<sup>2</sup> kolektorové plochy na jednu osobu a objem zásobníku jako 1,5 - 2 x denní potřeba teplé vody, minimálně však 50 l/m<sup>2</sup> kolektorové plochy. U větších obytných domů 1 m<sup>2</sup> kolektorové plochy na bytovou jednotku a 30 - 80 l/m<sup>2</sup> kolektorové plochy. Solární pokrytí pro ohřev teplé vody by se měl podle doporučení pohybovat okolo 60 % pro malé systémy a 30 - 45 % pro středně velké systémy.

### 1.3 SOLÁRNÍ ZÁSOBNÍK TEPLA

Zásobníky tepla jsou nedílnou součástí solární sestavy pro ohřev teplé vody. Umožňují ukládání teplé vody na pozdější využití do svého akumulčního objemu a překonávají nerovnoměrné solární tepelné zisky v průběhu dne.

#### 1.3.1 Tepelné ztráty zásobníku

Účinnost zásobníku tepla i celého termálního systému je značně ovlivněna tepelnými ztrátami. V průběhu času nashromážděné teplo uniká ze zásobníku tepla do okolního prostoru přes jeho stěny.

Výpočet tepelných ztrát zásobníku je blíže popsán v ČSN EN 15316-3-3 [27]. Norma popisuje stanovení tepelných ztrát pro elektrický zásobník s přerušovanou i nepřerušovanou dodávkou tepla a pro zásobník s tepelným výměníkem využívajícím plyn. V případě elektrického zásobníku s přerušovanou dodávkou tepla se stanoví tepelné ztráty podle vztahu (1.3-1):

$$Q_{W,ls} = Q_{W,ls,n} \cdot \left( \frac{A_{W,mn}}{A_{W,max}} \right)^n \quad (1.3-1)$$

kde  $Q_{W,ls}$  tepelné ztráty zásobníku [MJ/den];  
 $Q_{W,ls,n}$  normová hodnota pro ztráty tepla [MJ/den];  
 $A_{W,mn}$  ekvivalentní povrch zásobníku odpovídající střední hodnotě denního cyklu [m<sup>2</sup>];  
 $A_{W,max}$  povrch uvažovaný pro výpočet, je-li ohříváč ohřátý [m<sup>2</sup>];  
 $n$  součinitel prostupu tepla [-]

Plocha pláště zásobníku se vypočítá podle vztahu (1.3-2):

$$A_{W,max} = \pi \cdot D_W \cdot L_W + 2\pi \cdot \frac{D_W^2}{4} \cdot n \cdot \frac{L_W}{D_W} \quad (1.3-2)$$

kde  $A_{W,max}$  plocha pláště zásobníku [m<sup>2</sup>];  
 $D_W$  vnější průměr zásobníku [m];  
 $L_W$  vnější výška zásobníku [m];  
 $n$  součinitel prostupu tepla,  $n = 1,25$  [-]

Ekvivalentní povrch zásobníku odpovídající dennímu odběru teplé vody se vypočítá vztahem (1.3-3):

$$A_{W,mn} = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^5 A_{W,i} \cdot (t_{(i+1)} - t_i) \quad (1.3-3)$$

kde  $A_{W,mn}$  ekvivalentní povrch zásobníku odpovídající střední hodnotě denního cyklu [ $m^2$ ];  
 $A_{W,i}$  ekvivalentní povrch zásobníku pro časový krok  $i$  [ $m^2$ ];  
 $\tau_i$  doba odběru teplé vody [hod]

V případě nepřetržité dodávky tepla se ztráta tepla zásobníku vypočítá ze ztráty v pohotovostním stavu s korekcí na skutečný rozdíl teplot pomocí vztahu (1.3-4):

$$Q_{W,ls} = \frac{\theta_{W,avg} - \theta_{a,avg}}{45} \cdot \frac{Q_{W,m}}{(t_{(i+1)} - t_i)} \cdot 24 \quad (1.3-4)$$

kde  $Q_{W,ls}$  tepelné ztráty zásobníku [MJ/den];  
 $\theta_{W,avg}$  průměrná teplota vody v zásobníku tepla [ $^{\circ}C$ ];  
 $\theta_{a,avg}$  průměrná teplota okolního prostředí [ $^{\circ}C$ ];  
 $Q_{W,m}$  ztráta tepla zásobníku tepla v pohotovostním stavu při průměrném rozdílu teplot  $45^{\circ}C$  v průběhu zkoušky [MJ]

Zjednodušený algoritmus pro výpočet tepelné ztráty vychází ze součinu součinitele prostupu tepla konstrukce, plochy konstrukce a rozdílu teplot na obou stranách. V případě zásobníku se jedná o rozdíl teploty vody v zásobníku a teploty okolního vzduchu. Tepelné ztráty zásobníku se zjednodušeným vztahem (1.3-5) určí následovně:

$$Q_{zk} = U \cdot A \cdot (T_z - T_{env}) \quad (1.3-5)$$

kde  $Q_{zk}$  tepelná ztráta zásobníku [W];  
 $U$  součinitel prostupu tepla pláštěm zásobníku [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];  
 $A$  plocha pláště zásobníku [ $m^2$ ];  
 $T_z$  teplota vody v zásobníku [K];  
 $T_{env}$  teplota okolí [K]

Pokud se jedná o zásobník vody využívající k jejímu ohřevu plynná paliva, určí se ztráty tepla zásobníku vztahem (1.3-6):

$$Q_{W,ls} = \frac{(\theta_{W,avg} - \theta_{amb,avg})}{\Delta\theta_{W,avg}} \cdot \frac{3,6 \cdot P_{W,ls}}{1000} \cdot 24 + (1 - \eta) \cdot Q_{W,out} \quad (1.3-6)$$

kde  $Q_{W,ls}$  tepelné ztráty zásobníku [Wh/měsíc];  
 $\Delta\theta_{W,avg}$  průměrný rozdíl teplot použitý pro stanovení výkonu pro udržení teploty vody [ $^{\circ}C$ ];  
 $P_{W,ls}$  příkon pro udržení teploty v zásobníku [W];  
 $\eta$  účinnost plynového ohříváče [-];  
 $Q_{W,out}$  dodávka tepla z plynového ohříváče [MJ/den]



### 1.3.2 Ohřev teplé vody

Jedním z rozhodujících parametrů při návrhu solárního systému je předpokládaná doba ohřátí vody na požadovanou teplotu. Množství tepla, potřebného k ohřevu, vychází z objemu zásobníku vody a teploty, na kterou musí být voda ohřátá (1.3-7):

$$Q = \frac{V_z \cdot \rho \cdot (h_1 - h_2)}{3600} \quad (1.3-7)$$

kde  $V_z$  objem zásobníku [ $\text{m}^3$ ];  
 $\rho$  měrná objemová hmotnost vody [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  
 $h_1$  měrná entalpie vody na konci ohřevu [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ];  
 $h_2$  měrná entalpie vody na počátku ohřevu [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ];

Doba ohřevu se určí z podílu množství tepla potřebného pro ohřev na požadovanou teplotu a výkonu zdroje tepla (1.3-8):

$$\tau = \frac{Q}{P \cdot \eta} \quad (1.3-8)$$

kde  $\tau$  doba ohřevu teplé vody [hod];  
 $Q$  množství tepla potřebného k ohřevu [kWh];  
 $P$  výkon zdroje tepla [kW];  
 $\eta$  účinnost zdroje tepla [-]

### 1.3.3 Odběr teplé vody

Návrh zásobníkového ohřevu teplé vody vychází z českých a evropských norem ČSN 06 0320 a ČSN EN 12 831 [28][29]. Dle provozu budovy a počtu uživatelů se určí denní potřeba teplé vody. Následně se vypočítá teplo odebrané uživateli a teplo ztracené vlivem tepelných ztrát systému. Na základě harmonogramu odběru teplé vody řešené budovy se vytvoří odběrový diagram, ze kterého odečteme hodnotu maximálního rozdílu mezi křivkou odběru a křivkou dodávky teplé vody. Z tohoto maxima se určí velikost zásobníku.

Celkové teplo odebrané z ohřivače se skládá z tepla odebraného uživateli a tepla ztraceného při ohřevu a distribuci. Celkové odebrané teplo se počítá dle vztahu (1.3-9):

$$Q_{2p} = Q_{2t} + Q_{2z} = Q_{2t} + (Q_{2t} \cdot z) = V_{2p} \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot (1 + z) \quad (1.3-9)$$

kde  $Q_{2p}$  celkové teplo odebrané z ohřivače [kWh/den];  
 $Q_{2t}$  teplo odebrané uživatelem [kWh/den];  
 $Q_{2z}$  teplo ztracené při ohřevu a distribuci [kWh/den];  
 $V_{2p}$  celková denní potřeba teplé vody [ $\text{m}^3/\text{den}$ ];  
 $\rho$  měrná objemová hmotnost vody [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  
 $c$  měrná tepelná kapacita vody [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ];

- $\theta_1$  teplota na vstupu do zásobníku [°C];  
 $\theta_2$  teplota na výstupu ze zásobníku [°C];  
 $z$  součinitel ztráty tepla při ohřevu a distribuci teplé vody [-]

Velikost zásobníku vychází z maximálního rozdílu mezi teplem odebraným a teplem dodaným, jež určen pomocí odběrového diagramu. Příklad odběrového diagramu je na Obr. 1.3-1. Velikost zásobníku teplé vody se vypočítá následujícím vztahem (1.3-10):

$$V_z = \frac{\Delta Q_{\max}}{\rho \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1)} \quad (1.3-10)$$

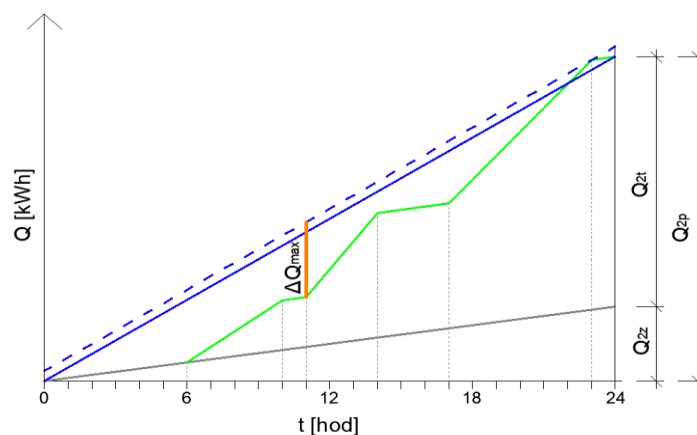
- kde  $V_z$  velikost zásobníku [m<sup>3</sup>];  
 $\Delta Q_{\max}$  maximální rozdíl mezi odebraným a dodaným teplem [kWh];  
 $\rho$  měrná objemová hmotnost vody [kg/m<sup>3</sup>];  
 $c$  měrná tepelná kapacita vody [J/(kg.K)];  
 $\theta_1$  teplota na vstupu do zásobníku [°C];  
 $\theta_2$  teplota na výstupu ze zásobníku [°C]

#### 1.3.4 Odběrový diagram

Odběrový diagram má dvě osy. Na svislé ose diagramu se vykresluje teplo v kWh, na vodorovné ose časový úsek v hodinách.

Příklad odběrového diagramu je na Obr. 1.3-1. Zelená křivka představuje odběr tepla uživateli. Modrá křivka představuje dodávku tepla do objektu. V případě nedostatečného množství dodaného tepla v některém z časových úseků, musí být dodávka navýšena, jak je ukázáno křivkou přerušovanou.

Časová osa se volí podle provozu objektu. Může odpovídat délce jedné pracovní směny nebo celodennímu užívání. Předpokládaný odběr teplé vody se procentuálně rozdělí v rámci zvoleného časového úseku. Návrh odběru je nejvýhodnější zvolit podle skutečných časů, které mohou být zjištěny za pomoci dlouhodobého měření obdobných objektů.



Obr. 1.3-1: Příklad odběrového diagramu

### 1.3.5 Rozvody potrubí - součinitel prostupu tepla potrubí

Zvoleným materiálem pro rozvody potrubí solární soustavy je měď s dimenzí 28 x 1,5 mm. Vnější průměr trubky je  $d_p = 28$  mm s tloušťkou stěny  $s_p = 1,5$  mm a povrch trubky délky 1 m odpovídá ploše  $S_1 = 0,0880$  m<sup>2</sup>/m [30]. Tepelná vodivost potrubí je  $\lambda_p = 393$  W/(m·K) [31]. Potrubí je opatřeno tepelnou izolací tloušťky 50 mm s hodnotou tepelné vodivosti  $\lambda_{iz} = 0,04$  W/(m·K), součinitel sálání povrchu tepelné izolace je  $C = 4,65$  W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>). Ve výpočtu je uvažováno s použitím teplonosné látky na bázi polypropylen glykolu. Poměr objemové koncentrace je 60 % polypropylen glykol a 40 % voda. Parametry pro teplonosnou kapalinu jsou pro uvažovanou průměrnou teplotu 50 °C. Hustota kapaliny je  $\rho = 1013$  kg/m<sup>3</sup>, kinematická viskozita je  $\nu = 1,38 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, tepelná kapacita je  $c = 3,95$  kJ/(kg·K), tepelná vodivost je  $\lambda = 0,38$  W/(m·K) a rychlost proudící kapaliny je  $w = 0,27$  m/s.

Výpočet součinitele prostupu tepla potrubím podle vyhlášky č. 193/2007 Sb. [32], je uvažován pro případ tepelně izolovaných trubních rozvodů (1.3-1):

$$U_p = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_i \cdot (d_p - 2 \cdot s_p)} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_p} \cdot \ln \frac{d_p}{(d_p - 2 \cdot s_p)} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{iz}} \cdot \ln \frac{d_{iz}}{d_p} + \frac{1}{\alpha_e \cdot d_{iz}}} \quad (1.3-11)$$

kde  $U_p$  součinitel prostupu tepla potrubí [W/(m·K);  
 $\alpha_i$  součinitel přestupu tepla na vnitřní straně povrchu potrubí [W/(m<sup>2</sup>·K);  
 $\alpha_e$  součinitel přestupu tepla na vnější straně povrchu potrubí (izolace) [W/(m<sup>2</sup>·K);  
 $d_p$  vnější průměr potrubí [m];  
 $s_p$  tloušťka stěny potrubí [m];  
 $\lambda_p$  měrná tepelná vodivost materiálu potrubí [W/(m·K)];  
 $d_{iz}$  vnější průměr izolace [m];  
 $\lambda_{iz}$  měrná tepelná vodivost materiálu potrubí [W/(m·K)]

Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně povrchu potrubí vychází z Nusseltova čísla (1.3-12):

$$\alpha_i = \frac{N_u \cdot \lambda_f}{(d_p - 2 \cdot s_p)} \quad (1.3-12)$$

kde  $N_u$  Nusseltovo číslo [-];  
 $\lambda_f$  měrná tepelná vodivost kapaliny [W/(m·K)];  
 $d_p$  vnější průměr potrubí [m];  
 $s_p$  tloušťka stěny potrubí [m]

Nusseltovo číslo závisí na proudění vzduchu. Zdali se jedná o prostor uzavřený, volný nebo venkovní prostředí.

Součinitel přestupu tepla na vnější straně povrchu potrubí je součtem součinitele přestupu tepla konvekcí a radiací (1.3-13):

$$\alpha_e = \alpha_k + \alpha_r \quad (1.3-13)$$

kde  $\alpha_k$  součinitel přestupu tepla konvekcí na povrchu izolace [W/(m<sup>2</sup>·K)];  
 $\alpha_r$  součinitel přestupu tepla radiací na povrchu izolace [W/(m<sup>2</sup>·K)]

Konvekční složka součinitele přestupu tepla na povrchu tepelné izolace se stanovuje na základě rozdílu teplot a vnějšího průměru tepelné izolace (1.3-14):

$$\alpha_k = 1,02 \cdot \sqrt[4]{\frac{\theta_{1,p} - \theta_{2,p}}{d_{is}}} \quad (1.3-14)$$

kde  $\theta_{1,p}$  teplota kapaliny v daném úseku potrubí [°C];  
 $\theta_{2,p}$  teplota okolního vzduchu v daném úseku potrubí [°C];  
 $d_{is}$  vnější průměr izolace [m]

Radiační složka součinitele přestupu tepla vychází ze součinitele sálání použitého materiálu a rozdílu teplot (1.3-15):

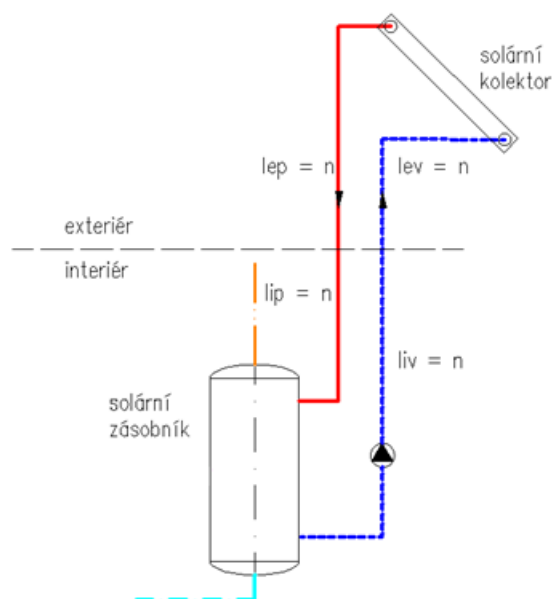
$$\alpha_r = \frac{C}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1.3-15)$$

kde  $C$  součinitel sálání potrubí nebo povrchu izolace [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)];  
 $\theta_1$  teplota kapaliny v daném úseku potrubí [°C];  
 $\theta_2$  teplota okolního vzduchu v daném úseku potrubí [°C];  
 $T_1$  absolutní teplota kapaliny v daném úseku potrubí [K];  
 $T_2$  absolutní teplota okolního vzduchu v daném úseku potrubí [K]

### 1.3.6 Tepelné ztráty rozvodů teplé vody

Potrubí je jednou z částí systému, kde dochází k tepelným ztrátám. Blíže se touto problematikou zabývá vyhláška č. 193/2007 Sb. [32] a odborné příspěvky [33][34]. Tepelné ztráty potrubí jsou ovlivněny okolním prostředím, kterým jsou rozvody vedeny.

Schéma trubních rozvodů zjednodušeného modelu je na Obr. 1.3-2. Solární soustava je rozdělena na část nacházející se v interiéru (solární zásobník, úsek přívodního potrubí  $l_{ip}$  a úsek vratného potrubí  $l_{iv}$ ) a část nacházející se v exteriéru (solární kolektor, úsek přívodního potrubí  $l_{ep}$  a úsek vratného potrubí  $l_{ev}$ ). Ve zjednodušeném modelu mají všechny zmíněné úseky potrubí shodnou délku  $n$ .



Obr. 1.3-2: Schéma solární sestavy s vyznačením jednotlivých úseků potrubí [35]

Simulace byly provedeny pro délky potrubí  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, 10$  m. Tudiž pro  $n = 1$  je celková délka rozvodů 4 m a podíl tepelné ztráty trubicích rozvodů 2,2 %. Souhrn výsledků simulací je uveden v Tab. 1.3-1.

Tab. 1.3-1: Tepelná ztráta potrubí pro jednotlivé délky úseků v numerickém modelu

Délka potrubí $n$	Ztráta potrubím	Využitelné teplo solární soustavy	Podíl tepelné ztráty potrubím
0	0	1501	0.0
1	33	1468	2.2
2	66	1435	4.4
3	99	1402	6.6
4	131	1370	8.7
5	164	1337	11.0
6	197	1304	13.1
7	236	1265	15.7
8	263	1238	17.5
9	295	1206	19.7
10	328	1173	21.9
m	kWh/rok	kWh/rok	%

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem práce je vyhodnocení optimální velikosti solárního zásobníku pro přípravu teplé vody v závislosti na kolektorové ploše a odběru teplé vody. Vzhledem k rozsahu uvažovaných variant, je zvoleno simulační řešení, umožňující tripl-parametrické vyhodnocení. Navržený numerický model umožňuje volitelné nastavení vstupních parametrů jednotlivých prvků, při zachování jednotné solární sestavy.

Konkrétní cíle disertační práce jsou:

- Rozbor okrajových podmínek potřebných k návrhu solárního zásobníku tepla. Nalezení solárních zásobníků dostupných na současném trhu a aplikování jejich technických parametrů v navrženém simulačním modelu.
- Vytvoření modelu stávající solární soustavy v simulačním softwaru TRNSYS.
- Validování modelu solární soustavy podle reálného provozu stávající solární soustavy. Zvolené parametry pro validaci modelu jsou:
  - Intenzita dopadajícího solárního záření
  - Venkovní teplota
  - Teplota na výstupu z kolektoru.
- Využití simulačního modelu pro provedení více-parametrických simulací s cílem optimalizace návrhu akumulčního objemu solárního zásobníku. Hlavními parametry jsou akumulční objem solárního zásobníku, kolektorová plocha a odběr teplé vody uživateli. Hodnotící kritéria jsou:
  - Solární pokrytí potřeby tepla
  - Poměr solárních a elektrických zisků pro pokrytí potřeby tepla
  - Tepelná bilance solárního zásobníku
  - Teplená ztráta vztažena na 1 l objemu zásobníku a 1 m<sup>2</sup> kolektorové plochy
  - Maximální dosažená teplota kapaliny v solárním zásobníku.
- Porovnání současných poznatků a postupů návrhu solárních zásobníků s výsledky simulací.

### 3 METODY ŘEŠENÍ

Práce využívá dvě metody řešení, a to řešení teoretické a řešení experimentální. Hlavním složkou práce jsou simulace provedené na vytvořeném modelu solární soustavy. Model byl validován prostřednictvím dat z experimentálního měření na reálné soustavě a výsledky verifikovány s ručním výpočtem.

#### 3.1 EXPERIMENTÁLNÍ ŘEŠENÍ

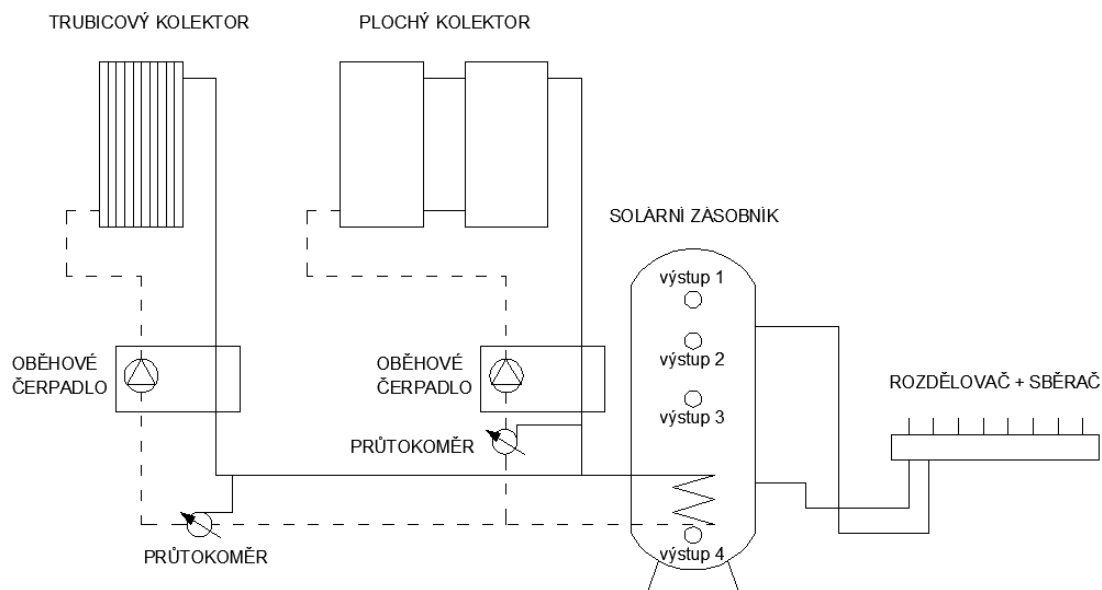
Solární soustava se nachází na ploché střešní konstrukci budovy E2, jež je součástí komplexu budov Vysokého učení technického v Brně, fakulty stavební. Volba této soustavy spočívá v dostupnosti a variačním řešení, kdy si lze zvolit ohřev pomocí plochých kolektorů, trubicového kolektoru nebo jejich kombinaci (Obr. 3.1-1, Obr. 3.1-2).

##### 3.1.1 Měřená sestava

Soustava se skládá ze dvou sériově zapojených plochých kapalinových kolektorů celkové plochy  $4\text{ m}^2$  a jednoho trubicového kapalinového kolektoru celkové plochy  $1,8\text{ m}^2$ , které jsou instalovány ve sklonu  $45^\circ$  na jižní světovou stranu. Okruhy kolektorů mají společný akumulční stratifikační zásobník o objemu 200 l. Každý solární okruh má vlastní oběhové čerpadlo, jehož pomocí se dopravuje ohřátá kapalina ze solárních kolektorů do solárního zásobníku. Teplá užitková voda se ze zásobníku dopravuje do sdruženého rozdělovače a sběrače instalovaného v laboratoři technických zařízení budov. Parametry akumulčního zásobníku, plochých kolektorů a trubicového kolektoru byly převzaty z technických listů výrobce (viz. 3.3.3).



Obr. 3.1-1: Měřená solární sestava [36]



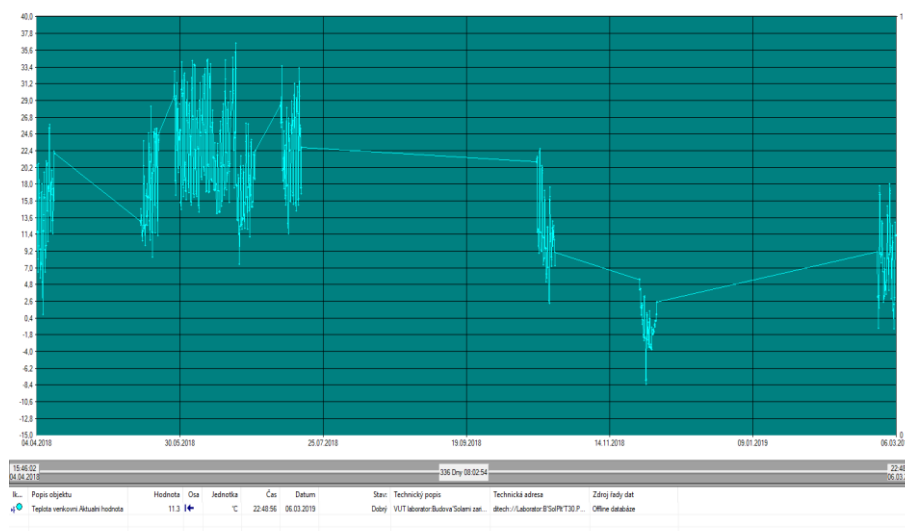
Obr. 3.1-2: Schéma měřené solární sestavy [36]

### 3.1.2 Metoda měření

Měřená data jsou zaznamenávána prostřednictvím rozvaděče dodaného firmou Siemens. Rozvaděč obsahuje řídicí systém pro řízení budov. Výroková řada má název DESIGO s procesorem PXC64-U (Obr. 3.1-4). Informace předávané do podstavce PXC64-U jsou zobrazovány přes grafickou nadstavbu INSIGHT (Obr. 3.1-3).

Instalovanými senzory slouží k měření intenzity dopadajícího slunečního záření, venkovní teploty a do menší míry vlivu větru a povrchové teploty konstrukcí (viz. 3.1.3). Data jsou zapisována v časovém intervalu 1 minuty. Následné zpracování dat lze provést v programu Excel.

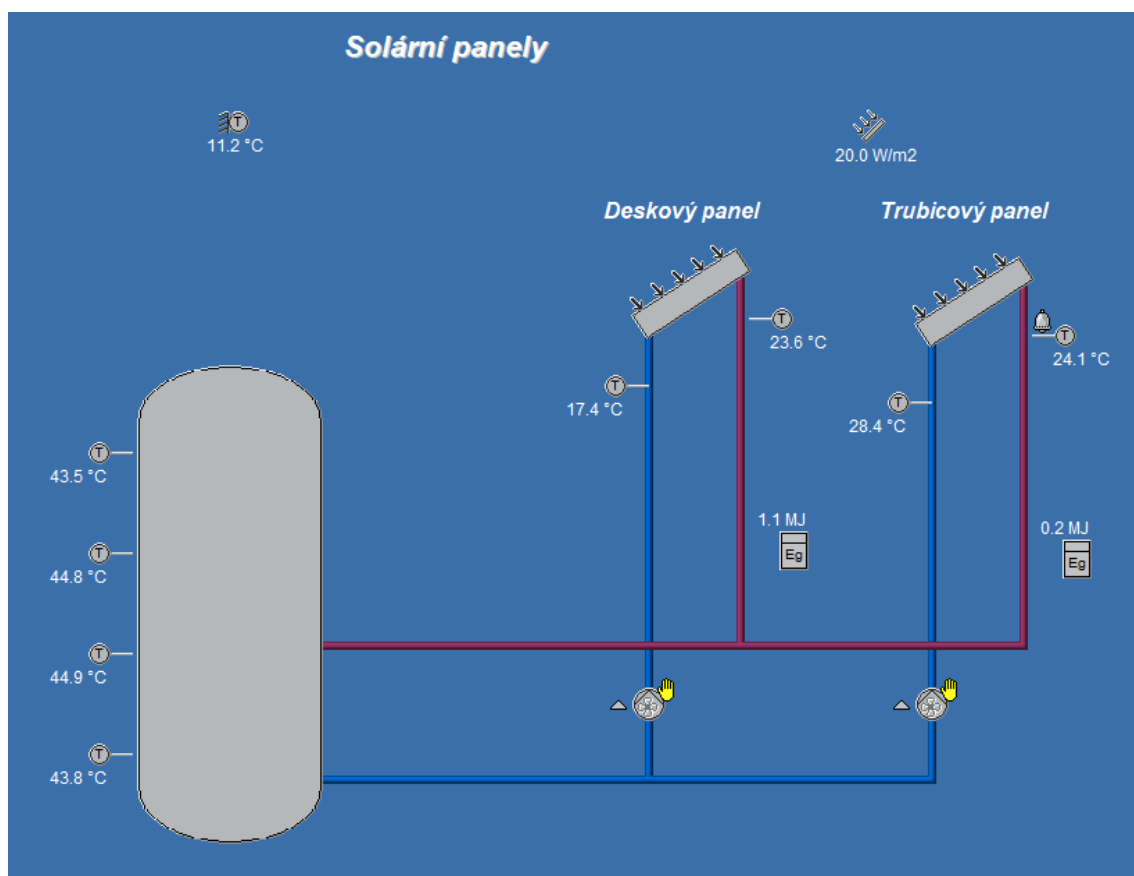
Model v programu DESIGO umožňuje vzdálené vypnutí nebo zapnutí oběhových čerpadel.



Obr. 3.1-3: Ukázka záznamu naměřených dat v grafické nadstavbě DESIGO-INSIGHT



Podle požadavku lze měřit data pro případ ohřevu teplé vody pouze větví s plochým kolektorem, pouze větví s trubicovým kolektorem nebo při současném chodu obou větví. Zaznamenávají jsou teplota venkovního prostředí, intenzita dopadajícího slunečního záření, teploty na vstupu do solárních kolektorů, teploty na výstupu ze solárních kolektorů a teploty v jednotlivých stratifikačních vrstvách solárního zásobníku.



Obr. 3.1-4: Schéma solární soustavy v programu DESIGO

### 3.1.3 Měřicí technika

#### ▪ Měřená solární sestava

Intenzita slunečního záření je měřena prostřednictvím snímače oslunění pro vyrovnání teplot Honeywell SAF25. Snímač obsahuje dva snímací elementy, které jsou určeny k měření venkovní teploty a sluneční radiace, na jejichž základě je následně systém vytápění ekvitermně regulován. Provozní příkon se pohybuje od 0 V do 10 V. Snímač je schopný naměřit intenzitu dopadajícího slunečního záření do 1000 W/m<sup>2</sup>.

Venkovní snímač QAC22 slouží jako referenční čidlo pro ekvitermní regulaci systému a pro optimalizování systému ve spolupráci s řídicím systémem objektu. Čidlo pracuje v rozsahu teploty - 50 °C až + 70 °C. Přesnost měření je ± 0,4 K při teplotě 0 °C. Přípustné venkovní podmínky pro správnou funkčnost čidla jsou teplota v rozsahu - 50 °C až + 70 °C a relativní

vlhkost v rozsahu 0 % až 100 %. Data jsou zaznamenávána při teplotě okolního prostředí – 25 °C až + 65 °C a relativní vlhkosti < 85 %.

Modulární procesní podstanice PXC64-U slouží k řízení a regulaci technických zařízení budov. Zpracovává hodnoty zaslané snímači SAF25 a QAC22. Provozní podmínky okolního prostředí jsou teplota v rozsahu 0 °C až + 50 °C a relativní vlhkost < 85 %.

- Meteorologická stanice TUBO

Pyranometr Kipp & Zonen CMP3 je snímač se sériově zapojenými termočládky, jež měří intenzitu celkového dopadajícího solárního záření. Pracovní rozsah teploty čidla se pohybuje od - 40 °C do + 80 °C. Přítomné termočládky jsou schopné zachytit hodnotu intenzity solárního záření až po 2000 W/m<sup>2</sup>.

Snímač teploty Sensit NS520-120 je určen pro kontaktní měření teploty kapalných nebo plyných látek. Standardní teplotní rozsah použití snímačů je od – 30 °C do + 150 °C (do + 250 °C při prodloužení stonku snímače).

#### 3.1.4 Využití experimentálního měření pro validaci modelu

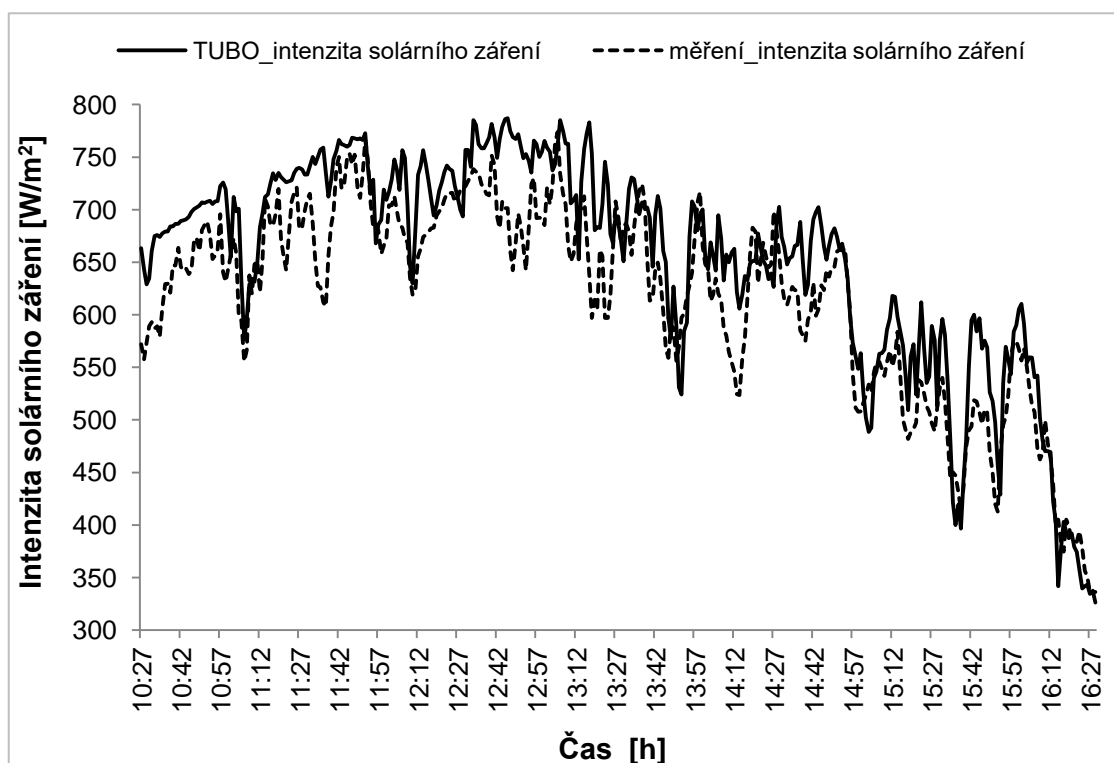
Validace vytvořeného modelu byla provedena porovnáním hodnot intenzity solárního záření dopadajícího na plochu kolektorů, teploty na výstupu z kolektoru a okolní teploty. Hodnoty byly odebrány ze snímačů umístěných na instalované solární soustavě a z hodnot získaných prostřednictvím simulací s použitím klimatických dat z meteorologické stanice TUBO.

Pro simulace byla vybrána klimatická data ze dvou lokalit. Klimatická data z meteorologické stanice TUBO, umístěné na střeše sousedního objektu v areálu Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně, byla použita pro validování simulačního modelu. Použitá data odpovídala časovému úseku reálného měření. Klimatická data z meteorologické stanice Kuchařovice, která jsou využívána v simulacích pro Moravský a Slezský kraj, byla následně zvolena pro provedené jednotlivé simulace. Použitá klimatická data Kuchařovice jsou desetiletým průměrem z let 1996 - 2005.

Porovnání dat je provedeno pro 6.5.2014 a časový úsek od 10:27 do 16:27 hodin, kdy začalo stmívání. Ranní záznam nebyl použit, z důvodu ztráty dat při stahování.

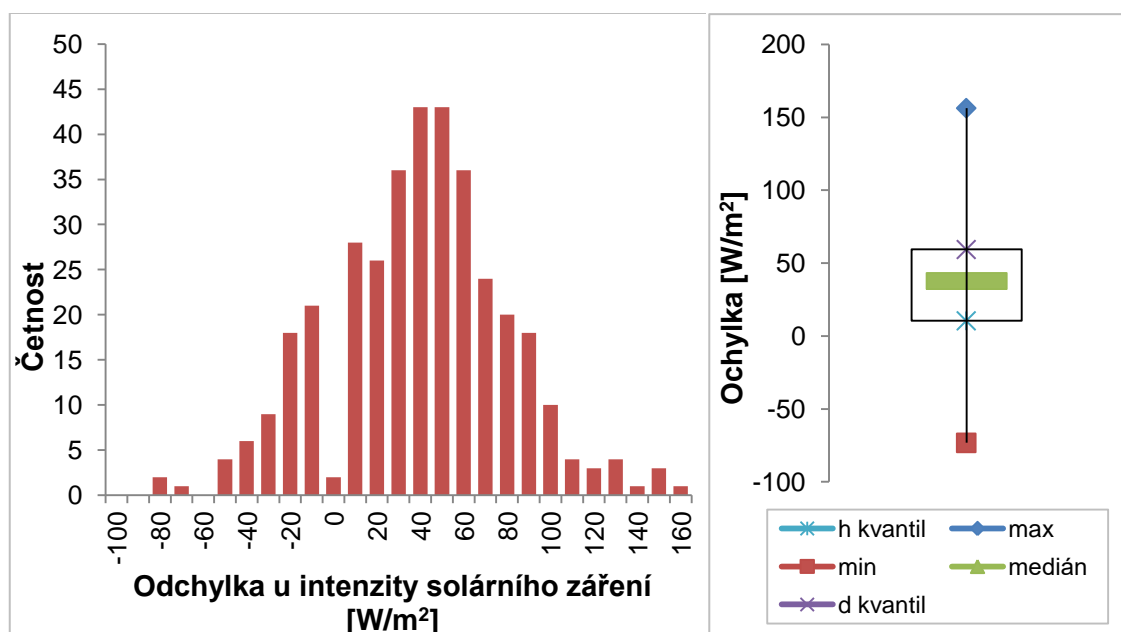
Validace dat z numerického modelu byla provedena formou histogramu a krabicového grafu (viz. Obr. 3.1-6, Obr. 3.1-8 a Obr. 3.1-10).

Zaznamenaná intenzita naměřeného dopadajícího solárního záření, vykreslena přerušovanou křivkou, dosáhla v průběhu dne hodnoty okolo 780 W/m<sup>2</sup> (viz. Obr. 3.1-5). Data kolísala v závislosti na oblačnosti, jež je možné vidět na plné křivce představující intenzitu solárního záření z meteorologické stanice TUBO, se kterými byla porovnávána.



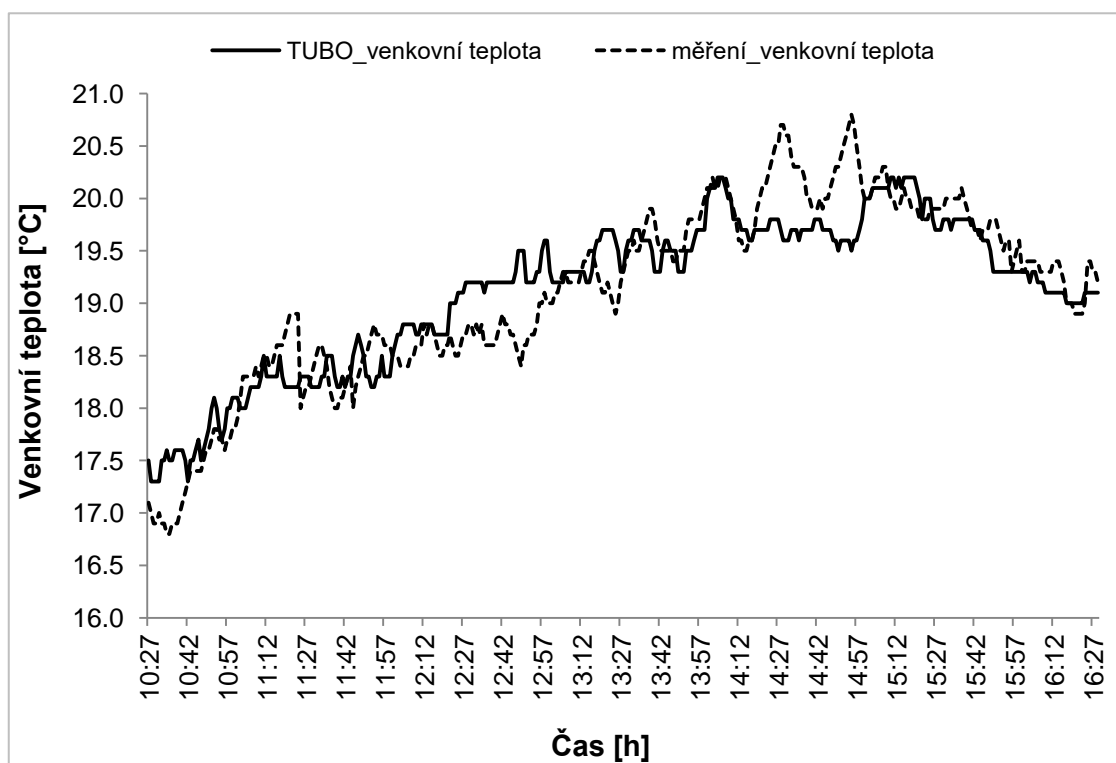
Obr. 3.1-5: Validace modelu – intenzita dopadajícího slunečního záření

Odchylka mezi porovnávanými hodnotami intenzity solárního záření se pohybovala v rozmezí  $-80 \text{ W/m}^2$  až  $+160 \text{ W/m}^2$ . Nejčastější odchylka byla mezi  $30$  až  $50 \text{ W/m}^2$ . Medián stanul na hodnotě  $38 \text{ W/m}^2$ .



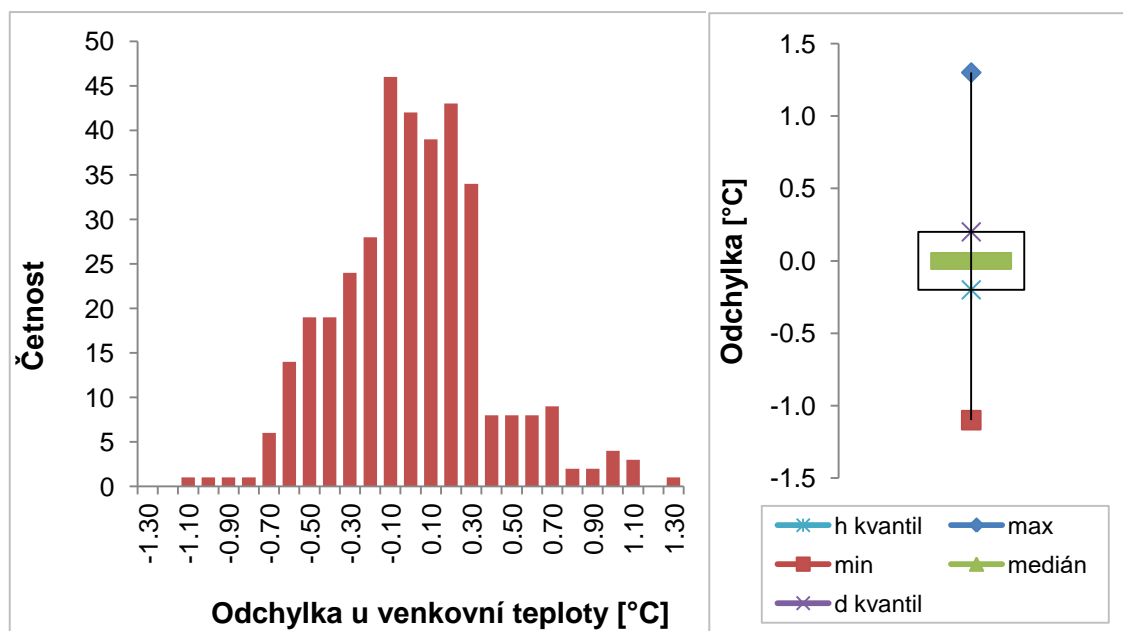
Obr. 3.1-6: Histogram a krabicový graf pro intenzitu solárního záření

Naměřená venkovní teplota (přerušovaná křivka) v průběhu dne stoupla až k  $21^\circ\text{C}$  (viz. Obr. 3.1-7). Nejvyšších teplot bylo dosaženo mezi 14:00 a 15:00 hodinou odpolední.



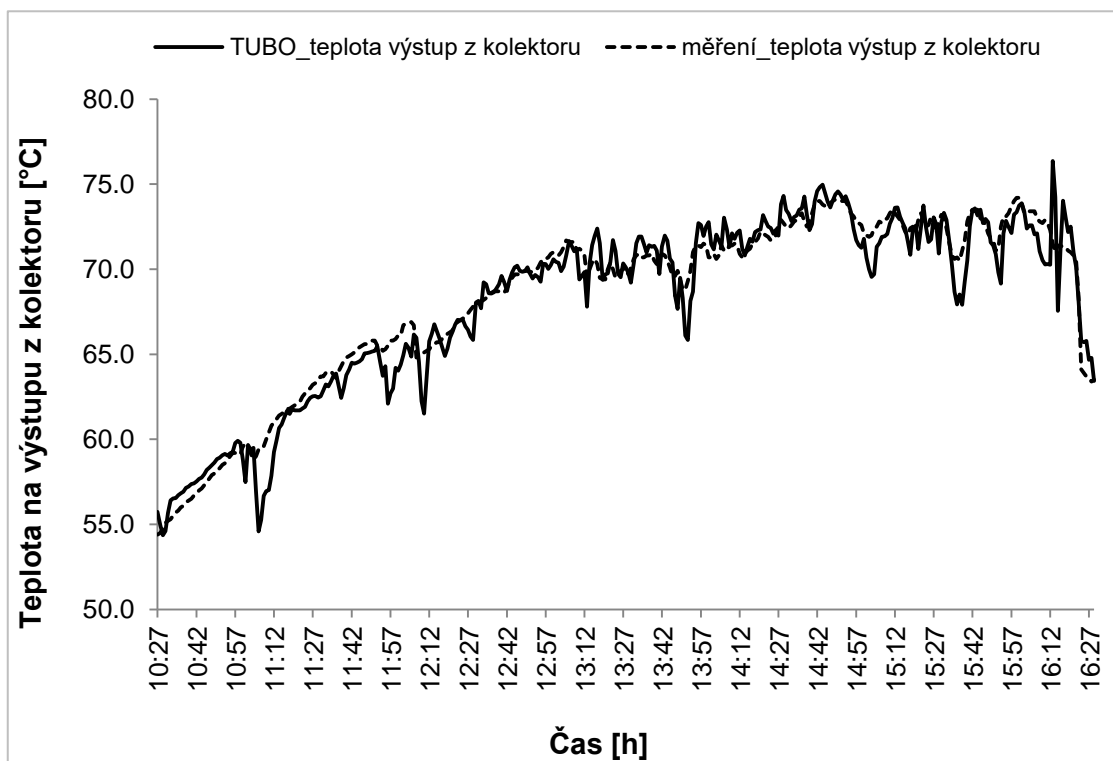
Obr. 3.1-7: Validace modelu – venkovní teplota

Odchylka mezi porovnávanými hodnotami venkovní teploty se pohybovala v rozmezí – 1,1 °C až + 1,3 °C. Medián odchylky má hodnotu 0 °C.



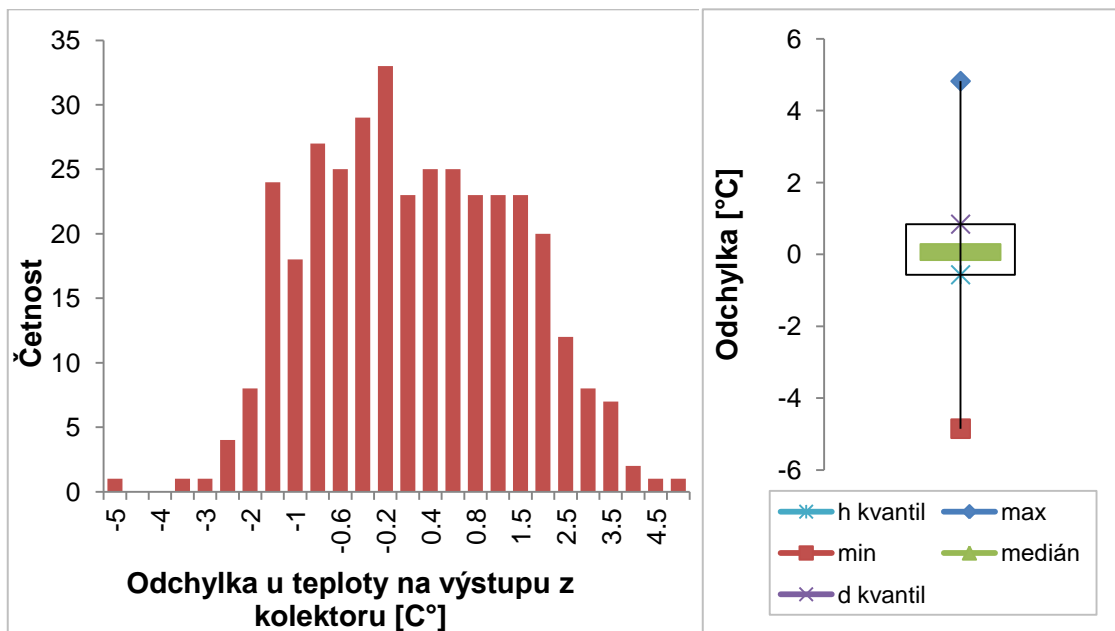
Obr. 3.1-8: Histogram a krabicový graf pro venkovní teplotu

Naměřená teplota kapaliny na výstupu ze solárního kolektoru (přerušovaná křivka), v měřeném časovém úseku, započala na hodnotě 55 °C a dosáhla až k 75 °C (Obr. 3.1-9). Od 13:00 do 16:00 hodiny kolísala teplota mezi 70 °C a 75 °C.



Obr. 3.1-9: Validace modelu – teplota kapaliny na výstupu z kolektoru

Odchylka mezi naměřenou teplotou a teplotou získanou ze simulačního modelu se pohybovala od  $-4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Medián odchylky má hodnotu  $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 3.1-10: Histogram a krabicový graf pro teplotu kapaliny na výstupu z kolektoru

## 3.2 ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ

Solární soustava je navrhována prostřednictvím zjednodušeného výpočtového postupu energetického hodnocení uvedeného v normě TNI 73 0302 [37]. Zjednodušená metoda je použitelná pro solární soustavy orientované  $\pm 45^\circ$  k jihu a sklonu kolektorů  $0^\circ$  až  $90^\circ$  [38].

### 3.2.1 Metoda výpočtu

Metodika výpočtu ve své zjednodušenosti udává pouze orientační výsledky energetické bilance solární soustavy a solárního pokrytí. Potřeba tepla daného objektu se určuje z naměřených hodnot nebo hypoteticky, kdy se ve výpočtu zohledňují předpokládané tepelné ztráty samotné solární soustavy (3.2-1):

$$Q_{tv,m\acute{e}s} = (1 + z) \cdot \frac{V_{tv,den} \cdot c \cdot \rho \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{3,6 \cdot 10^6} \cdot n \quad (3.2-1)$$

kde  $Q_{tv,m\acute{e}s}$  měsíční potřeba tepla [kWh/měs];  
 $z$  přírážka pro zahrnutí tepelných ztrát [-];  
 $V_{tv,den}$  předpokládaná denní potřeba teplé vody [m<sup>3</sup>/den];  
 $c$  měrná tepelná kapacita vody [J/(kg·K)];  
 $\rho$  měrná objemová hmotnost vody [kg/m<sup>3</sup>];  
 $\theta_1$  požadovaná teplota teplé vody [°C];  
 $\theta_2$  teplota vody z vodovodního řádu [°C];  
 $n_{den}$  počet dnů v měsíci [-]

Celkový tepelný zisk solární soustavy vychází z parametrů kolektorové plochy a předpokládaných tepelných ztrát (3.2-2):

$$Q_{ss,u} = 0,9 \cdot \eta_k \cdot H_T \cdot S_A \cdot (1 - p) \quad (3.2-2)$$

kde  $Q_{ss,u}$  využitelné tepelné zisky solární soustavy [kWh/měs];  
 $\eta_k$  střední měsíční účinnost solárního kolektoru [-];  
 $H_T$  měsíční dávka solárního ozáření [kWh/(m<sup>2</sup>·měs)];  
 $S_A$  plocha solárních kolektorů [m<sup>2</sup>];  
 $p$  srážka z tepelných zisků vlivem tepelných ztrát [-]

Solární podíl představuje poměr tepla dodaného solární soustavou vůči teple potřebnému pro přípravu teplé vody, vytápění, ohřev bazénové vody nebo jejich kombinací (3.2-3):

$$f = \frac{\sum Q_{ss,u}}{\sum Q_{tv,m\acute{e}s}} \cdot 100 \quad (3.2-3)$$

kde  $f$  solární podíl [%];  
 $Q_{ss,u}$  využitelné tepelné zisky solární soustavy [kWh/rok];  
 $Q_{tv,m\acute{e}s}$  roční potřeba tepla [kWh/rok]

### 3.2.2 Solární podíl

Solární podíl malých solárních soustav by se měl pohybovat okolo 60 %, aby bylo možné zajistit dostatečné pokrytí potřeby tepla a soustava byla vhodně navržena z hlediska investičních a následně provozních nákladů.

Souhrn předpokládaných solárních podílů uvažovaných variant získaných zjednodušeným výpočtem je vidět v Tab. 3.2-1. Červenou barvou jsou vypsány varianty se solárním podílem pod 50 %, černou barvou varianty s podílem nad 60 % a zelenou barvou podíly v rozmezí 50 % až 60 %.

Analytické řešení neuvažuje ve výpočtu s akumulacním objemem solárního zásobníku. Ten se projevuje až v řešení simulačním, kdy se kapacita zásobníku navyšovala s ohledem na výsledky získané výpočtem, tak aby byly přibližně shodné. Jednalo se o zásobníky o objemu 150 l, 200 l, 250 l, 300 l a 400 l. Objem rostl se zvyšující se kolektorovou plochou a při vyšších odběrech teplé vody.

Tab. 3.2-1: Předpokládaný solární podíl získaný výpočtem v procentech

		Celková plocha apertury solárních kolektorů [m <sup>2</sup> ]										
		1,87	3,74	5,61	7,48	9,35	11,22	13,09	14,96	16,83	18,70	20,57
Odběr teplé vody [l/den]	50	62	74	79	83	85	87	89	89	90	91	92
	100	38	62	69	74	77	79	81	83	84	85	86
	150	26	50	62	67	72	74	76	78	79	80	82
	200	19	38	54	62	66	69	72	74	76	77	78
	250	15	31	46	56	62	66	68	71	73	74	76
	300	13	26	38	50	57	62	65	67	69	72	73
	350	11	22	33	44	53	58	62	65	67	69	70
	400	10	19	29	38	48	54	58	62	64	66	68
	450	9	17	26	34	43	50	55	58	62	64	66
	500	8	15	23	31	38	46	52	56	59	62	64

Tepelné ztráty solární soustavy jsou v simulacích uvažovány jako 25 % srážky ze solárních zisků. Větší předpokládaná ztráta je způsobena chybějící tepelnou izolací některých úseků soustavy.

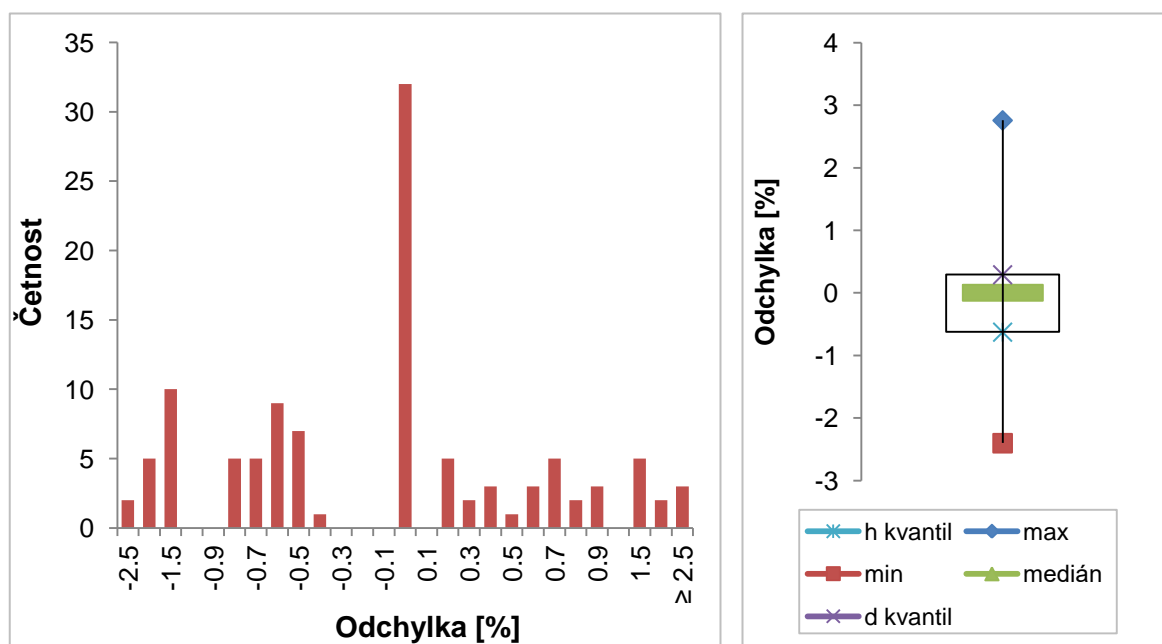
Simulace jsou provedeny pro kolektorovou plochu v rozsahu 1 až 11 kolektorů o ploše 1,87 m<sup>2</sup> až 20,57 m<sup>2</sup>. Zvolený odběr teplé vody představuje 50 l/(os.den). Odběr je stanoven pro rozsah 1 až 10 uživatelů, tedy 50 l/den až 500 l/den.

Souhrn solárního podílu použité solární soustavy, dosaženého simulačním řešením, je v Tab. 3.2-2. Některé varianty nebylo možné nasimulovat z důvodu chybové hlášky způsobené přesažením hraničních hodnot simulačního modelu.

Tab. 3.2-2: Předpokládaný solární podíl získaný simulací v procentech

		Celková plocha apertury solárních kolektorů [m <sup>2</sup> ]										
		1,87	3,74	5,61	7,48	9,35	11,22	13,09	14,96	16,83	18,70	20,57
Odběr teplé vody [l/den]	50	66	74	79	80	83	85	90	92	92	92	-
	100	37	61	69	76	77	77	80	81	85	88	-
	150	25	49	63	68	72	76	75	78	81	81	83
	200	19	39	53	62	64	69	70	74	74	76	77
	250	15	31	46	54	61	64	67	70	70	76	76
	300	13	27	38	49	59	60	66	67	67	73	74
	350	11	23	33	42	52	57	60	65	64	68	69
	400	-	20	30	39	47	55	57	61	64	66	67
	450	-	18	26	35	43	51	55	57	63	65	68
	500	-	16	24	31	37	45	52	53	58	60	63

Odchylka mezi ručním výpočtem solárního podílu bez zahrnutí solárního zásobníku a výsledky získané prostřednictvím simulací pro zásobníky o objemu 150 l až 400 l jsou porovnány formou histogramu a krabicového grafu (viz. Obr. 3.2-1).



Obr. 3.2-1: Histogram a krabicový graf pro solární podíl

Odchylka mezi porovnávanými hodnotami solárního podílu se pohybovala v rozmezí – 2,4 % až + 2,8 %. Nejčastější odchylka byla 0 % v počtu 32 ze 110 variant. Medián stanul na hodnotě 0 %.



### 3.3 SIMULAČNÍ ŘEŠENÍ

Simulace jsou řešeny pomocí energetického simulačního softwaru TRNSYS (Transient System Simulation) [3]. Nástroj je vytvořen odborníky ze Spojených států amerických. Jedná se komplexní a flexibilní software, jež umožňuje nejen simulace systémů využívající tepelnou a elektrickou energii, ale také simulaci dynamických systémů jako jsou například biologické procesy.

#### 3.3.1 *Simulační software TRNSYS*

Simulační software TRNSYS je otevřenou platformou. Nabízí předpřipravené komponenty z knihovny prvků a současně umožňuje vytváření vlastních komponentů. Nevýhodou je nejednotná forma dostupných komponentů, právě z důvodu jejich vytvořením různými autory.

Software využívá pro výpočty soustavu matematických a fyzikálních vztahů. Jejich vlivem je umožněno dosáhnout simulace závislé na časovém kroku, avšak nezávislé na lokalitě. Tento způsob vyhodnocování dat modelu simulace, umožňuje vkládání vlastních externích dat i právě vytváření vlastních komponentů.

#### 3.3.2 *Model solární soustavy*

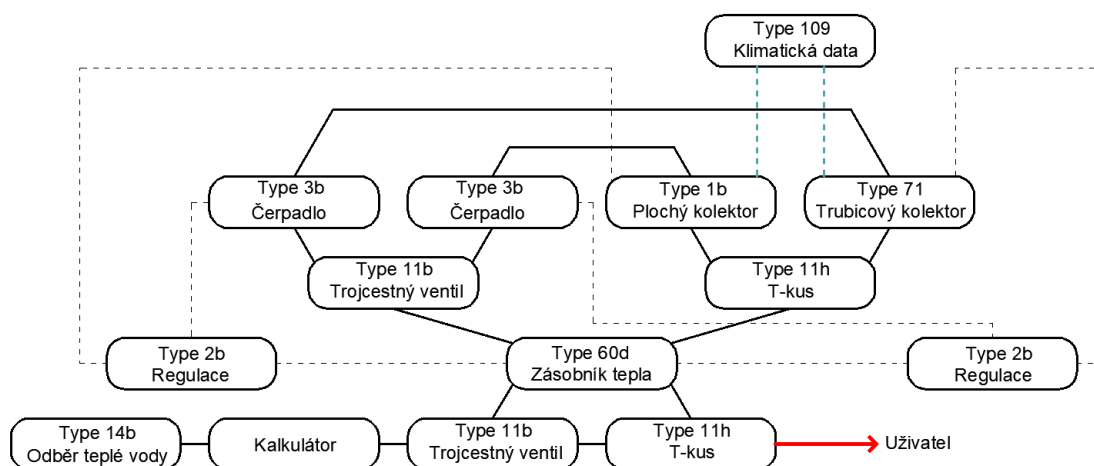
Model je navržen a validován na základě reálné solární soustavy (viz. 3.1). Soustava umožňuje ohřev teplé vody plochým termickým kolektorem, trubicovým kolektorem nebo jejich kombinací.

Klimatická data odpovídají desetiletému naměřenému průměru z meteorologické stanice Kuchařovice, okres Znojmo. Data byla měřena v období od roku 1996 do roku 2005.

Regulace systému probíhá na základě teploty vody ve vnitřním výměníku. Přesažením maximální provozní teploty 95 °C dochází k vypnutí oběhového čerpadla.

Požadovaný rozsah teploty teplé vody na straně uživatele je zajištěn bivalentním ohřevem a regulací samotného zásobníku. Poklesem teploty pod 50 °C se zapne elektrické topné těleso, ohřívající vodu na teplotu 60 °C. Volba odběru teplé vody je popsána v kapitole 3.3.3.

Model soustavy je sestaven z komponentů dostupných v databázi knihovny simulačního softwaru. Jednotlivé komponenty jsou od různých autorů a tudíž rozsah dostupných informací i samotné provedení komponentu je na odlišných úrovních. Některé komponenty jsou podrobnější a nabízejí více možností pro simulaci. Jiné poskytují část matematických a fyzikálních vztahů, se kterými pracují.



Obr. 3.3-1: Schéma modelu solární soustavy

#### ▪ Komponent zásobníku tepla

Modul Type 60 představuje stratifikační zásobník s možností instalace vnitřního zdroje tepla a výměníku. Slouží k nepřímému ohřevu teplé vody. Jako zdroj tepla může být použito například tepelné čerpadlo nebo solární soustava.

Zásobník může být navržen jako stratifikační nebo zcela promíchaný. Maximální počet stratifikačních vrstev je 100. Modul umožňuje volbu pevně umístěných nebo nastavitelných výstupů, rozdílný objem jednotlivých stratifikačních vrstev, nastavení teplotní odchylky od požadované teploty, zesílení nebo zúžení tepelné izolace, horizontální uložení zásobníku a stanovení tepelných ztrát do spalín v případě instalování vnitřního plynového ohříváče.

Odběr teplé vody probíhá ve dvou variantách. První varianta odebírá ohřátou vodu ze stratifikační vrstvy, jejíž teplota nejbližší odpovídá požadavku. Druhá varianta odebírá ohřátou vodu ze stratifikační vrstvy předem zvolené.

Modul umožňuje variantu s integrovaným plynovým ohříváčem, nacházejícím se v dolní části zásobníku. Spaliny jsou následně odvedeny potrubím vedeným středem zásobníku. Tepelné zisky jejich prostřednictvím jsou zahrnuty v tepelné bilanci.

#### ▪ elektrická topná tělesa

Komponent umožňuje zapojení až dvou elektrických topných těles. Ty operují ve dvou módech. První mód je master / slave, kdy spodní a horní topné tělesa nepracují současně. Spodní topné těleso se sepne pouze tehdy, když horní topné těleso již ohřálo vodu na své maximum. Druhý mód umožňuje současný chod obou topných těles. Kapalina v zásobníku se rychleji ohřeje na požadovanou teplotu na úkor vyšší spotřeby elektrické energie.

Elektrické topné těleso se sepne, pokud teplota v zásobníku poklesne pod teplotu nastavenou jako minimální  $T_{set}$  včetně odečtení teplotního rozsahu termostatu  $\Delta T_{db}$ .

- tepelná izolace

Zásobník nemusí mít tloušťku izolace stejnou po celém svém obvodu. Lze také uvažovat s oslabením izolace v místě napojení trubních rozvodů. Součinitel prostupu tepla v místě zesílení nebo oslabení tepelné izolace je řešen pomocí přírážky (3.3-1):

$$U_i = U + \Delta U_i \quad (3.3-1)$$

kde  $U_i$  součinitel prostupu tepla v místě zesílení / zeslabení [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];  
 $U$  součinitel prostupu tepla zásobníku [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];  
 $\Delta U_i$  přírážka součinitele prostupu tepla pro zesílení / zeslabení [ $(W/m^2 \cdot K)$ ]

Součástí zásobníku je pojistný ventil. V případě přehřátí zásobníku, je část kapaliny odvedena. Ztracený objem z důvodu přehřátí je zanedbán. Nevyužité teplo je připočteno k tepelným ztrátám do okolního prostoru.

- konfigurace zásobníku

Modul Type 60 umožňuje namodelování vertikálně i horizontálně uloženého zásobníku. Zásobník může mít až 100 stratifikačních vrstev. Další možností je instalace od jednoho do tří vnitřních výměníků tepla. Jako teplotonosnou látku si lze zvolit vodu, směs voda-propylen glykol a směs voda-etylen glykol.

- destratifikace zásobníku

Destratifikace zásobníku v místech styku jednotlivých stratifikačních vrstev a podél stěn se určí pomocí přírážky  $\Delta k$  (3.3-2) přičteného k hodnotě vodivosti kapaliny v zásobníku:

$$\Delta k = k_{wall} \cdot \frac{A_{c,wall}}{A_{c,water}} \quad (3.3-2)$$

kde  $\Delta k$  přírážka k tepelné vodivosti kapaliny při destratifikaci [ $W/(m \cdot K)$ ];  
 $k_{wall}$  tepelná vodivost stěny zásobníku [ $W/(m \cdot K)$ ];  
 $A_{c,wall}$  průřezová plocha zásobníku [ $m^2$ ];  
 $A_{c,water}$  průřezová plocha kapaliny v zásobníku [ $m^2$ ]

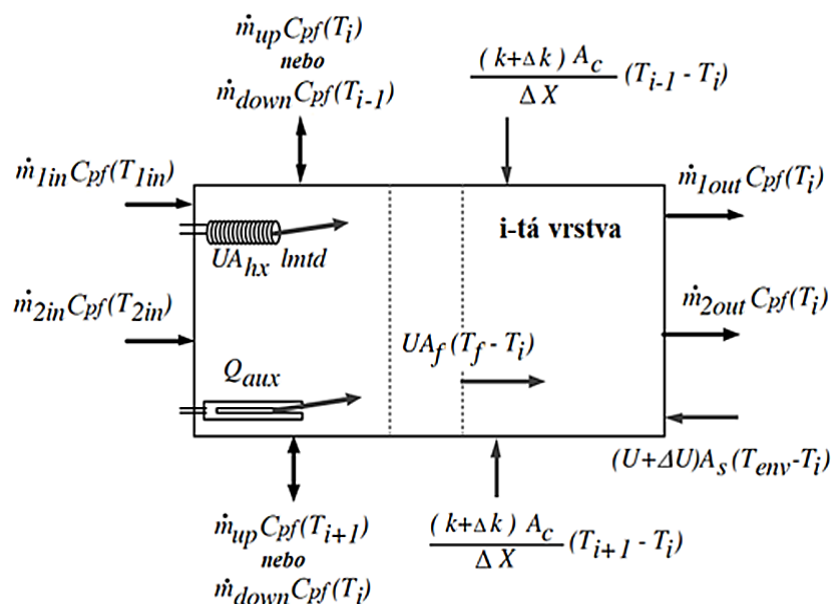
- energetická bilance zásobníku

Energetická bilance se stanovuje pro i-tou vrstvu zásobníku (3.3-3):

$$\begin{aligned}
 M_i \cdot C_{pf} \cdot \frac{dT_i}{dt} = & \frac{(k + \Delta k) \cdot A_{c,i}}{\Delta x_{i+1 \rightarrow i}} \cdot (T_{i+1} - T_i) + \frac{(k + \Delta k) \cdot A_{c,i}}{\Delta x_{i-1 \rightarrow i}} \cdot (T_{i-1} - T_i) \\
 & + (U + \Delta U_i) \cdot A_{s,i} \cdot (T_{env} - T_i) + UA_{f,i} \cdot (T_f - T_i) + \dot{m}_{down} \cdot C_{pf} \cdot (T_{i-1}) \\
 & - \dot{m}_{up} \cdot C_{pf} \cdot (T_i) - \dot{m}_{down} \cdot C_{pf} \cdot (T_i) - \dot{m}_{up} \cdot C_{pf} \cdot (T_{i+1}) + \gamma_{htr1} \cdot \dot{Q}_{aux1} \\
 & + \gamma_{htr2} \cdot \dot{Q}_{aux2} + UA_{hx1} \cdot (lmt d_1) + UA_{hx2} \cdot (lmt d_2) + UA_{hx3} \cdot (lmt d_3) \\
 & + \dot{m}_{1in} \cdot C_{pf} \cdot T_{1in} - \dot{m}_{1out} \cdot C_{pf} \cdot T_i + \dot{m}_{2in} \cdot T_{2in} - \dot{m}_{2out} \cdot C_{pf} \cdot T_i
 \end{aligned} \tag{3.3-3}$$

$M_i$	hmotnostní průtok ve stratifikační vrstvě i [kg/h];
$C_{pf}$	tepelná kapacita kapaliny proudící v kolektoru [kJ/(kg·K)];
$k$	tepelná vodivost kapaliny v zásobníku [W/(m·K)];
$\Delta k$	přirážka k tepelné vodivosti kapaliny při destratifikaci [W/(m·K)];
$A_{c,i}$	průřezová plocha stratifikační vrstvy i [m <sup>2</sup> ];
$A_{s,i}$	plocha pláště stratifikační vrstvy i [m <sup>2</sup> ];
$\Delta x$	osová vzdálenost mezi dvěma stratifikačními vrstvami [m];
$\dot{m}_{down}$	celkový průtok kapaliny v zásobníku směrem dolů [kg/h];
$\dot{m}_{up}$	celkový průtok kapaliny v zásobníku směrem nahoru [kg/h];
$\dot{m}_1$	průtok kapaliny na vstupu / výstupu 1 [kg/h];
$\dot{m}_2$	průtok kapaliny na vstupu / výstupu 2 [kg/h];
$T_i$	teplota kapaliny v i-té vrstvě [°C];
$T_f$	průměrná teplota spalínového vzduchu během vypnutého plynového ohřívače [°C];
$T_{env}$	teplota okolního prostředí [°C];
$U$	součinitel prostupu tepla zásobníku [W/(m <sup>2</sup> ·K)];
$\Delta U_i$	přirážka součinitele prostupu tepla pro zesílení / zeslabení [W/(m <sup>2</sup> ·K)];
$\gamma_{htr}$	kontrolní funkce ohřívače [-];
$\dot{Q}_{aux}$	množství přeměněné energie dodané vnitřním zdrojem tepla [W];
$(UA)_{f,i}$	tepelný tok přes plášť plynového ohřívače [W/K];
$(UA)_{hx}$	tepelný tok přes konstrukci tepelného výměníku [W/K];
$lmt d$	střední logaritmická hodnota teplotního rozdílu [K]

Předchozí matematická rovnice (3.3-3) je zobrazena graficky na Obr. 3.3-2.



Obr. 3.3-2: Grafické znázornění energetické balance i-té vrstvy zásobníku [39]

Součinitel přestupu tepla na vnější straně výměníku vychází z Nusseltova čísla (3.3-4):

$$\alpha = \frac{Nu_D(k)}{d_o} = \frac{C \cdot R_a^n(k)}{d_o} \quad (3.3-4)$$

- kde  $\alpha$  Součinitel přestupu tepla na vnější straně výměníku [-];  
 $Nu_D$  Nusseltovo číslo pro obtékání trubky na vnější straně [-];  
 $d_o$  vnější průměr potrubí výměníku [m];  
 $C$  konstanta v Nusseltově čísle [-];  
 $R_a$  Rayleightovo číslo [-];  
 $n$  exponent v Nusseltově čísle [-]

#### ▪ Komponent termického kolektoru

##### Plochý kolektor

Modul Type 1 slouží k určení tepelných zisků plochých termických kolektorů při aplikování vlastních parametrů. Vlastními parametry jsou míněny hodnoty udané výrobcem v technické dokumentaci zvoleného produktu a zjištěné v rámci testovacích podmínek. Modul je schopen aplikovat korekci výsledků mezi testovacími podmínkami a skutečnými podmínkami.

##### ▪ účinnost

Obecný vzorec pro výpočet účinnosti slunečního kolektoru vychází z jeho optické účinnosti a součinitelů tepelných ztrát (3.3-5):

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{(\Delta T)}{I_T} - a_2 \cdot \frac{(\Delta T)^2}{I_T} \quad (3.3-5)$$

kde  $\eta_0$  optická účinnost [-];  
 $a_1$  lineární součinitel tepelné ztráty [W/(m<sup>2</sup>·K)];  
 $a_2$  kvadratický součinitel tepelné ztráty [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>)];  
 $I_G$  globální sluneční záření dopadající na plochu kolektoru [W/m<sup>2</sup>]

Účinnost je definována jako poměr tepelného výkonu kolektoru a intenzity dopadajícího slunečního záření.

Pro konstantní klimatické podmínky je aplikována Hottel-Whillier-Blissova rovnice (3.3-6) [40]. Používá se pro testování plochých kolektorů. Provozem v testovací komoře za téměř konstantních podmínek se stanoví tepelný výkon a naměří se množství dopadajícího slunečního záření na jeho plochu, teplota okolního prostředí a teplota kapaliny na vstupu do kolektoru. Pomocí těchto parametrů lze následovně určit schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo a sklon dopadajícího slunečního záření na jeho plochu. Oba zmíněné parametry jsou ovlivněny teplotou a rychlostí větru (3.3-7).

$$\eta = \frac{Q_u}{A \cdot I_T} = \frac{\dot{m} \cdot C_{pf} \cdot (T_o - T_i)}{A \cdot I_T} = F_R (\tau\alpha)_n - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (3.3-6)$$

$$\eta = \frac{Q_u}{A \cdot I_T} = F_R (\tau\alpha)_n - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_i - T_a)}{I_T} - F_R \cdot U_{L/T} \cdot \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (3.3-7)$$

kde  $Q_u$  tepelný výkon kolektoru [W];  
 $A$  celková plocha kolektoru [m<sup>2</sup>];  
 $I_T$  intenzita slunečního záření dopadajícího na rovinu kolektoru [W/m<sup>2</sup>];  
 $\dot{m}$  hmotnostní průtok [kg/h];  
 $C_{pf}$  tepelná kapacita kapaliny proudící v kolektoru [kJ/(kg·K)];  
 $T_o$  teplota kapaliny na straně výstupu z kolektoru [°C];  
 $T_i$  teplota kapaliny na straně vstupu do kolektoru [°C];  
 $T_a$  teplota okolního prostředí [°C];  
 $F_R$  schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo [-];  
 $(\tau\alpha)_n$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru při obecném dopadu slunečního záření [-];  
 $U_L$  koeficient celkové tepelné ztráty kolektoru [W/(m<sup>2</sup>·K)];  
 $U_{LT}$  koeficient tepelné ztráty kolektoru závislý na teplotě T [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>)]

Teplotní rozdíl se běžně stanoví z teploty okolního prostředí a teploty kapaliny na vstupu do kolektoru. V některých případech se však pro testování kolektoru použije namísto teploty kapaliny na vstupu, teplota průměrná nebo teplota na výstupu (3.3-8):

$$\Delta T = \begin{cases} \Delta T_i = T_i - T_a \\ \Delta T_{av} = T_{av} - T_a \\ \Delta T_o = T_o - T_a \end{cases} \quad (3.3-8)$$

kde  $T_i$  teplota kapaliny na straně vstupu do kolektoru [°C];  
 $T_{av}$  průměrná teplota kapaliny v kolektoru [°C];  
 $T_o$  teplota kapaliny na straně výstupu z kolektoru [°C];  
 $T_{env}$  teplota okolního prostředí [°C]

Použití jiných teplot je zohledněno prostřednictvím modifikovaného koeficientu tepelné ztráty kolektoru  $U'_L$  (3.3-9):

$$U'_L = U_L + U_{L/T} \cdot (T_i - T_a) \quad (3.3-9)$$

kde  $U_L$  koeficient celkové tepelné ztráty kolektoru [W/(m<sup>2</sup>·K)];  
 $U_{L/T}$  koeficient tepelné ztráty kolektoru závislý na teplotě T [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>)]

Tento modifikovaný koeficient je následně uplatněn v rovnici účinnosti (3.3-10):

$$\eta = \frac{Q_u}{A \cdot I_T} = F_R (\tau\alpha)_n - F_R \cdot U'_L \cdot \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (3.3-10)$$

kde  $U'_L$  modifikovaný koeficient tepelné ztráty kolektoru [W/(m<sup>2</sup>·K)];  
 $F_R$  schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo [-];  
 $(\tau\alpha)_n$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru při obecném dopadu slunečního záření [-]

Korekční činitel pro výpočet účinnosti kolektoru, při použití teploty průměrné (3.3-11) nebo teploty na výstupu (3.3-12), vychází z testových parametrů podle Duffieho a Beckmana [41]:

$$\begin{cases} F_R (\tau\alpha) = F_{av} (\tau\alpha)_n \cdot \left( \frac{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf}}{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf} + \frac{F_{av} \cdot U'_L}{2}} \right) \\ F_R \cdot U'_L = F_{av} U'_L \cdot \left( \frac{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf}}{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf} + \frac{F_{av} \cdot U'_L}{2}} \right) \end{cases} \quad (3.3-11)$$

$$\begin{cases} F_R(\tau\alpha) = F_o(\tau\alpha)_n \cdot \left( \frac{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf}}{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf} + F_o \cdot U'_L} \right) \\ F_R \cdot U'_L = F_o U'_L \cdot \left( \frac{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf}}{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf} + F_o \cdot U'_L} \right) \end{cases} \quad (3.3-12)$$

kde  $F_{av}$  modifikovaná schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo při aplikování průměrné teploty kapaliny v kolektoru  $T_{av}$  místo  $T_i$  [-];  
 $F_o$  modifikovaná schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo při aplikování teploty kapaliny na straně výstupu z kolektoru  $T_o$  místo  $T_i$  [-];  
 $\dot{m}_{test}$  hmotnostní průtok při testovacích okrajových podmínkách [kg/h]

▪ korekce průtoku

Kolektory jsou testovány za určitého průtoku. Z toho důvodu se pro jinou hodnotu průtoku používá přepočtení korekčním činitelem  $r_1$  (3.3-13), kde se skutečný průtok porovnává s průtokem při testování.

Hodnota  $F'U_L$  (3.3-14) pro kapalinové kolektory dosahuje při testových a skutečných parametrech přibližně stejné hodnoty. Proto se aplikuje stejná hodnota pro stranu testovanou i skutečnou měřenou při výpočtu korekčního činitele  $r_1$ :

$$r_1 = \frac{F_R \cdot U'_L|_{use}}{F_R \cdot U'_L|_{test}} = \frac{F_R(\tau\alpha)_n|_{use}}{F_R(\tau\alpha)_n|_{test}} = \frac{\frac{\dot{m} \cdot C_{pf}}{A \cdot F' \cdot U_L} \cdot \left( 1 - e^{-\left( \frac{A \cdot F' \cdot U_L}{\dot{m} \cdot C_{pf}} \right)} \right)|_{use}}{\frac{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf}}{A \cdot F' \cdot U_L} \cdot \left( 1 - e^{-\left( \frac{A \cdot F' \cdot U_L}{\dot{m}_{test} \cdot C_{pf}} \right)} \right)|_{test}} \quad (3.3-13)$$

$$F' \cdot U_L = -\frac{\dot{m} \cdot C_{pf}}{A} \cdot \ln \left( 1 - \frac{F_R \cdot U'_L \cdot A}{\dot{m} \cdot C_{pf}} \right) \quad (3.3-14)$$

kde  $\dot{m}$  hmotnostní průtok [kg/h];  
 $\dot{m}_{test}$  hmotnostní průtok při testovacích okrajových podmínkách [kg/h];  
 $U'_L$  modifikovaný koeficient tepelné ztráty kolektoru [W/(m<sup>2</sup>·K)];  
 $F_R$  schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo [-];  
 $(\tau\alpha)_n$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru při obecném dopadu slunečního záření [-]

▪ sériové zapojení

Parametry  $F_R U'_L$  a  $F_R(\tau\alpha)_n$  jsou analyticky upraveny tak, aby zohlednily sériové zapojení kolektorů. Ve výpočtu je toto zapojení pojmenováno jako  $r_2$  (3.3-15):



$$r_2 = \frac{1 - \left(1 - \frac{A \cdot F_R \cdot U'_L}{\dot{m} \cdot C_{pf}}\right)^{N_S}}{N_S \cdot \left(\frac{A \cdot F_R \cdot U'_L}{\dot{m} \cdot C_{pf}}\right)} \quad (3.3-15)$$

kde  $N_S$  počet identických kolektorů sériově zapojených [-]

#### ▪ sluneční záření

Kolektory jsou testovány za jasné oblohy při běžné intenzitě dopadajícího slunečního záření, tak aby součinitel propustnosti a pohltivosti slunečního záření kolektoru  $(\tau\alpha)$  odpovídal přibližně hodnoty součinitele propustnosti a pohltivosti při obecném dopadu slunečního záření  $(\tau\alpha)_n$ . Schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo je pro odlišnou hodnotu intenzity slunečního záření stanoveno jako poměr  $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$  (3.3-16):

$$\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = \frac{I_{bT} \cdot \frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \cdot \frac{(\tau\alpha)_d}{(\tau\alpha)_n} + \rho_g \cdot I \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \cdot \frac{(\tau\alpha)_g}{(\tau\alpha)_n}}{I_T} \quad (3.3-16)$$

kde  $I_{bT}$  intenzita přímého slunečního záření dopadajícího na rovinu kolektoru [W/m<sup>2</sup>];  
 $I_d$  intenzita difúzního slunečního záření dopadajícího na horizontální rovinu [W/m<sup>2</sup>];  
 $I$  intenzita slunečního záření dopadajícího na horizontální rovinu [W/m<sup>2</sup>];  
 $I_T$  intenzita slunečního záření dopadajícího na rovinu kolektoru [W/m<sup>2</sup>];  
 $\rho_g$  schopnost zeminy odrazit sluneční záření [-];  
 $(\tau\alpha)$  součinitel propustnosti a pohltivosti slunečního záření kolektoru [-];  
 $(\tau\alpha)_n$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru při obecném dopadu slunečního záření [-];  
 $(\tau\alpha)_b$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru pro přímé sluneční záření [-];  
 $(\tau\alpha)_d$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru pro difúzní sluneční záření [-];  
 $(\tau\alpha)_g$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru pro sluneční záření odražené od zeminy [-]

U plochých kolektorů je jejich schopnost přeměnit sluneční záření na teplo určena jako poměr  $(\tau\alpha)_b/(\tau\alpha)_n$ , který vychází z výsledků testů od ASHRAE [42] (3.3-17):

$$\frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right) - b_1 \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right)^2 \quad (3.3-17)$$

kde  $(\tau\alpha)_n$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru při obecném dopadu slunečního záření [-];  
 $(\tau\alpha)_b$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru pro přímé sluneční záření [-];  
lineární součinitel modifikátoru úhlu dopadu IAM [-];

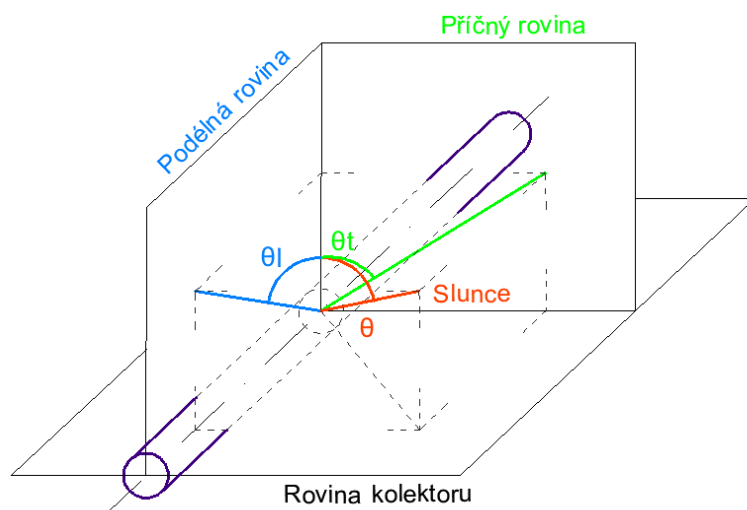
$b_0$  kvadratický součinitel modifikátoru úhlu dopadu IAM [-]  
 $b_1$

### Trubicový kolektor

Modul Type 71 představuje trubicový termický kolektor. Vychází ze stejných matematických rovnic jako Type 1, avšak navíc obsahuje modifikátor úhlu dopadu IAM, který zohledňuje zakřivení plochy jednotlivých trubic kolektoru.

- IAM pro přímé sluneční záření

Trubicové kolektory jsou opticky nesymetrické, z toho důvodu je ve výpočtu implementován příčný a podélný modifikátor úhlu dopadu IAM. Příčný úhel dopadu (modifikátor azimutu) leží v rovině kolmé k trubici kolektoru. Podélný úhel dopadu (modifikátor výšky) leží v rovině rovnoběžné s trubicí kolektoru a obsahuje jeho azimut.



Obr. 3.3-3: Příčný a podélný úhel dopadu slunečního záření

Vložená IAM data musí odpovídat natočení kolektoru ke světovým stranám. V TRNSYSu podélný a příčný úhel dopadu reprezentuje rovinu kolektoru a slunce.

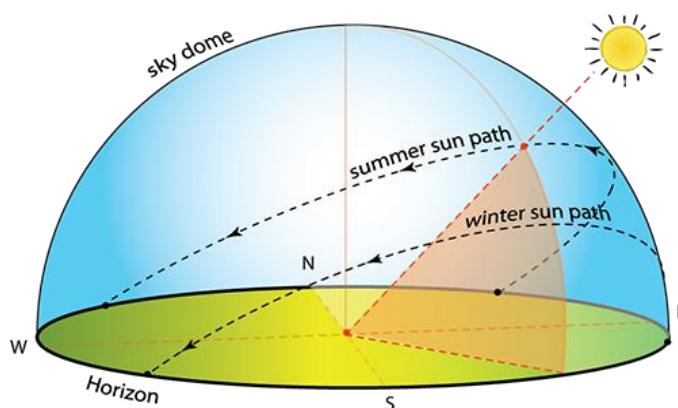
- IAM pro difúzní sluneční záření

Modifikátor úhlu dopadu (IAM) pro difúzní sluneční záření je vypočítán z poměru pohlceného difúzního záření vůči dopadajícímu difúznímu záření a zakřivení oblohy pro horizontálně instalovaný kolektor, pokud uvažujeme izotropické difúzní záření (3.3-18):

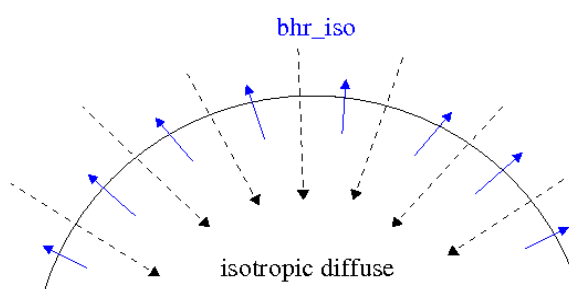
$$\frac{(\tau\alpha)_d}{(\tau\alpha)_n} = \frac{4}{\pi} \cdot \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} \cdot (\theta, \gamma_s) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\gamma_s \quad (3.3-18)$$

kde  $(\tau\alpha)_d$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru pro difúzní sluneční záření [-];

- $(\tau\alpha)_n$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru při obecném dopadu slunečního záření [-];  
 $(\tau\alpha)_b$  součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru pro přímé sluneční záření [-];  
 $\theta$  úhel dopadu přímého slunečního záření [°];  
 $\Theta$  sluneční azimut [°]  
 $\gamma_s$



Obr. 3.3-4: Dopad slunečního záření při zakřivení oblohy [43]



Obr. 3.3-5: Model izotropní bihemisférické odrazivosti difúzního záření [44]

#### ▪ Komponent oběhového čerpadla

Modul Type 3 může být použit jako oběhové čerpadlo nebo jako ventilátor. Slouží k výpočtu hmotnostního průtoku teplotnosné látky.

Teplota kapaliny na výstupu z oběhového čerpadla (3.3-19):

$$T_o = T_i + \frac{P_p \cdot f_{par}}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (3.3-19)$$

- kde  $T_o$  teplota kapaliny na výstupu [°C];  
 $T_i$  teplota kapaliny na vstupu [°C];  
 $P_p$  příkon [W];  
 $f_{par}$  schopnost zařízení předat kapalině potřebnou energii [-];  
 $\dot{m}$  hmotnostní průtok [kg/h];  
 $C_p$  tepelná kapacita kapaliny [kJ/(kg·K)]

Hmotnostní průtok se stanovuje podle (3.3-20):

$$\dot{m}_o = \gamma \cdot \dot{m}_{\max} \quad (3.3-20)$$

kde  $\dot{m}_o$  hmotnostní průtok kapaliny na výstupu [kg/h];  
 $\gamma$  kontrolní funkce ovlivňující jeho výkon a hmotnostní průtok ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ) [-];  
 $\dot{m}_{\max}$  maximální hmotnostní průtok kapaliny (když  $\gamma = 1$ ) [kg/h]

V případě poskytnutí pouze požadovaných vstupních parametrů, je vztah mezi příkonem a hmotnostním průtokem lineární (3.3-21):

$$P = \gamma \cdot P_{\max} \quad (3.3-21)$$

kde  $P_{\max}$  maximální příkon (když  $\gamma = 1$ ) [W]  
 $\gamma$  kontrolní funkce ovlivňující jeho výkon a hmotnostní průtok ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ) [-]

V případě poskytnutí více parametrů, je vztah mezi příkonem a hmotnostním průtokem polynomický (3.3-23). Nevyžadované parametry jsou použity v daném polynomu.

$$\dot{m} = 0 \rightarrow P = 0, T_o = T_{in} \quad (3.3-22)$$

$$\dot{m} > 0 \rightarrow P = P_{\max} [c_o + c_1 \cdot \gamma + c_2 \cdot \gamma^2 + \dots + c_i \cdot \gamma^i] \quad (3.3-23)$$

kde  $c_0 \sim c_i$  další volitelné parametry

#### ▪ Komponent regulace

Modul Type 2 obsahuje regulační funkci. Prostřednictvím tohoto komponentu, lze regulovat teplotu v soustavě podle předchozího požadavku. Modul automaticky přejde do stavu vypnuto, pokud je v soustavě překročena maximální povolená teplota.

Matematická formulace regulační funkce v případě, že komponent byl ve stavu zapnuto (3.3-24)(3.3-25):

$$\gamma_i = 1, \Delta T_L \leq (T_H - T_L) \rightarrow \gamma_o = 1 \quad (3.3-24)$$

$$\gamma_i = 1, \Delta T_L > (T_H - T_L) \rightarrow \gamma_o = 0 \quad (3.3-25)$$

kde  $\gamma_i$  regulační funkce na straně vstupu,  $\gamma_i = 0 \sim 1$  [-];  
 $\gamma_o$  regulační funkce na straně výstupu,  $\gamma_o = 0 \sim 1$  [-];  
 $T_L$  dolní hranice teploty na straně vstupu [°C];  
 $T_H$  horní hranice teploty na straně vstupu [°C];  
 $\Delta T_L$  dolní hranice odchylky od požadované teploty [°C];  
 $\Delta T_H$  horní hranice odchylky od požadované teploty [°C]

Matematická formulace regulační funkce v případě, že komponent byl ve stavu vypnuto (3.3-26)(3.3-27):

$$\gamma_i = 0, \Delta T_H \leq (T_H - T_L) \rightarrow \gamma_o = 1 \quad (3.3-26)$$

$$\gamma_i = 0, \Delta T_H > (T_H - T_L) \rightarrow \gamma_o = 0 \quad (3.3-27)$$

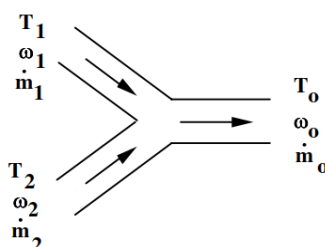
kde  $\gamma_i$  regulační funkce na straně vstupu,  $\gamma_i = 0 \sim 1$  [-];  
 $\gamma_o$  regulační funkce na straně výstupu,  $\gamma_o = 0 \sim 1$  [-];  
 $T_L$  dolní hranice teploty na straně vstupu [°C];  
 $T_H$  horní hranice teploty na straně vstupu [°C];  
 $\Delta T_L$  dolní hranice odchylky od požadované teploty [°C];  
 $\Delta T_H$  horní hranice odchylky od požadované teploty [°C]

#### ▪ Komponent T-kusu

Modul Type 11 představuje potrubní prvek T-kus, pracující v deseti módech. V módu 1 až 5 je ovlivněným parametrem teplota. Mód 6 až 10 ovlivňuje dva parametry, například teplotu a vlhkost.

#### ▪ T-kus bez regulace

Slouží ke smíšení dvou toků, o různé teplotě nebo vlhkosti, jedné teponosné látky.



Obr. 3.3-6: T-kus bez regulace [39]

Teplota na straně výstupu je váženým průměrem dvou toků o rozdílných teplotách a průtoku (3.3-28):

$$T_o = \frac{\dot{m}_1 \cdot T_1 + \dot{m}_2 \cdot T_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (3.3-28)$$

kde  $T_o$  teplota teponosné látky na výstupu [°C];  
 $\dot{m}_1$  hmotnostní průtok teponosné látky první větve [kg/h];  
 $\dot{m}_2$  hmotnostní průtok teponosné látky druhé větve [kg/h];  
 $T_1$  teplota teponosné látky první větve [°C];  
 $T_2$  teplota teponosné látky druhé větve [°C]

Popřípadě lze stejným způsobem určit výslednou vlhkost (3.3-29):

$$\omega_0 = \frac{\dot{m}_1 \cdot \omega_1 + \dot{m}_2 \cdot \omega_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (3.3-29)$$

kde  $\omega_0$  vlhkost teplotnosné látky na výstupu [°C];  
 $\dot{m}_1$  hmotnostní průtok teplotnosné látky první větve [kg/h];  
 $\dot{m}_2$  hmotnostní průtok teplotnosné látky druhé větve [kg/h];  
 $\omega_1$  vlhkost teplotnosné látky první větve [°C];  
 $\omega_2$  vlhkost teplotnosné látky druhé větve [°C]

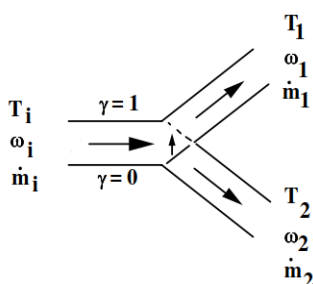
Výsledný průtok je součtem průtoků obou toků (3.3-30):

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (3.3-30)$$

kde  $\dot{m}_0$  hmotnostní průtok teplotnosné látky na výstupu [kg/h];  
 $\dot{m}_1$  hmotnostní průtok teplotnosné látky první větve [kg/h];  
 $\dot{m}_2$  hmotnostní průtok teplotnosné látky druhé větve [kg/h]

- T-kus s funkcí rozdělovací s regulací

Slouží k rozdělení toku do dvou větví. Dělení závisí na hodnotě regulační funkce  $\gamma$ .



Obr. 3.3-7: T-kus rozdělovací s regulací [39]

Pro případ  $\gamma = 1$ , jsou teplota / vlhkost první větve shodné s parametry teplotnosné látky na vstupu (3.3-31). Pokud je  $\gamma = 0$ , pak přebírá hodnotu teploty / vlhkosti větev druhá (3.3-32).

$$\begin{cases} T_1 = T_i \\ \omega_1 = \omega_i \\ \dot{m}_1 = \dot{m}_i \cdot (1 - \gamma) \end{cases} \quad (3.3-31)$$

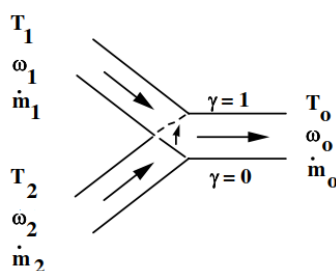
$$\begin{cases} T_2 = T_i \\ \omega_2 = \omega_i \\ \dot{m}_2 = \dot{m}_i \cdot \gamma \end{cases} \quad (3.3-32)$$

kde  $T_i$  teplota teplotnosné látky na vstupu [°C];  
 $T_1$  teplota teplotnosné látky první větve [°C];  
 $T_2$  teplota teplotnosné látky druhé větve [°C];

$\dot{m}_i$	hmotnostní průtok teplotonosné látky na vstupu [kg/h];
$\dot{m}_1$	hmotnostní průtok teplotonosné látky první větve [kg/h];
$\dot{m}_2$	hmotnostní průtok teplotonosné látky druhé větve [kg/h];
$\omega_i$	vlhkost teplotonosné látky na vstupu [°C];
$\omega_1$	vlhkost teplotonosné látky první větve [°C];
$\omega_2$	vlhkost teplotonosné látky druhé větve [°C];
$\gamma$	regulační funkce, $\gamma = 0$ nebo $1$ [-]

▪ T-kus s funkcí směšovací s regulací

Slouží ke smíšení dvou toků. Výsledné hodnoty teploty / vlhkosti a průtoku závisí na hodnotě regulační funkce  $\gamma$ .



Obr. 3.3-8: T-kus směšovací s regulací [39]

Teplota na straně výstupu vychází ze dvou toků o rozdílných teplotách a průtoku ovlivněných regulací (3.3-34):

$$T_o = \frac{\dot{m}_1 \cdot T_1 \cdot (1 - \gamma) + \dot{m}_2 \cdot T_2 \cdot \gamma}{\dot{m}_1 \cdot (1 - \gamma) + \dot{m}_2 \cdot \gamma} \quad (3.3-33)$$

kde	$T_o$	teplota teplotonosné látky na výstupu [°C];
	$\dot{m}_1$	hmotnostní průtok teplotonosné látky první větve [kg/h];
	$\dot{m}_2$	hmotnostní průtok teplotonosné látky druhé větve [kg/h];
	$T_1$	teplota teplotonosné látky první větve [°C];
	$T_2$	teplota teplotonosné látky druhé větve [°C];
	$\gamma$	regulační funkce, $\gamma = 0$ nebo $1$ [-]

Stejným způsobem určit výslednou vlhkost (3.3-34):

$$\omega_o = \frac{\dot{m}_1 \cdot \omega_1 \cdot (1 - \gamma) + \dot{m}_2 \cdot \omega_2 \cdot \gamma}{\dot{m}_1 \cdot (1 - \gamma) + \dot{m}_2 \cdot \gamma} \quad (3.3-34)$$

kde	$\omega_o$	vlhkost teplotonosné látky na výstupu [°C];
	$\omega_1$	vlhkost teplotonosné látky první větve [°C];
	$\omega_2$	vlhkost teplotonosné látky druhé větve [°C];
	$\gamma$	regulační funkce, $\gamma = 0$ nebo $1$ [-]

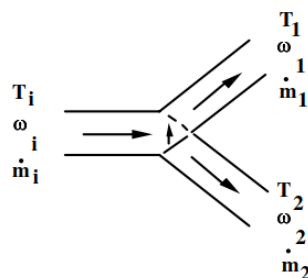
Výsledný průtok po smíšení obou toků závisí na regulaci (3.3-35):

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_1 \cdot (1 - \gamma) + \dot{m}_2 \cdot \gamma \quad 3.3-35)$$

kde  $\dot{m}_0$  hmotnostní průtok teplotonosné látky na výstupu [kg/h];  
 $\dot{m}_1$  hmotnostní průtok teplotonosné látky první větve [kg/h];  
 $\dot{m}_2$  hmotnostní průtok teplotonosné látky druhé větve [kg/h];  
 $\gamma$  regulační funkce,  $\gamma = 0$  nebo  $1$  [-]

- T-kus s funkcí armatury trojcestné směřovací

Umožňuje regulaci výsledné teploty podle požadavků. Slouží k dosažení a udržování teploty teplé vody na straně odběru uživatelem.



Obr. 3.3-9: T-kus s funkcí trojcestné směřovací armatury [39]

### 3.3.3 Návrhové parametry

Parametry komponentů použitých v simulačním modelu, jsou převzaty z technických listů výrobců. Hlavními komponenty jsou solární zásobník, solární kolektor a návrh odběru teplé vody, které jsou následně použity při simulacích jednotlivých variant.



Solární soustava byla zvolena se zásobníkem pro nepřímý ohřev teplé vody. Vybrané zásobníky umožňují napojení bivalentního zdroje tepla. Pro účel simulace byla zvolena elektrická topná tyč o výkonu 1,2 kW až 3 kW. Výkon druhého zdroje závisel na pokrytí potřeby teplé vody podle odběru a dodaných tepelných zisků ze solárních kolektorů.



Tab. 3.3-1: Parametry vybraných solárních zásobníků

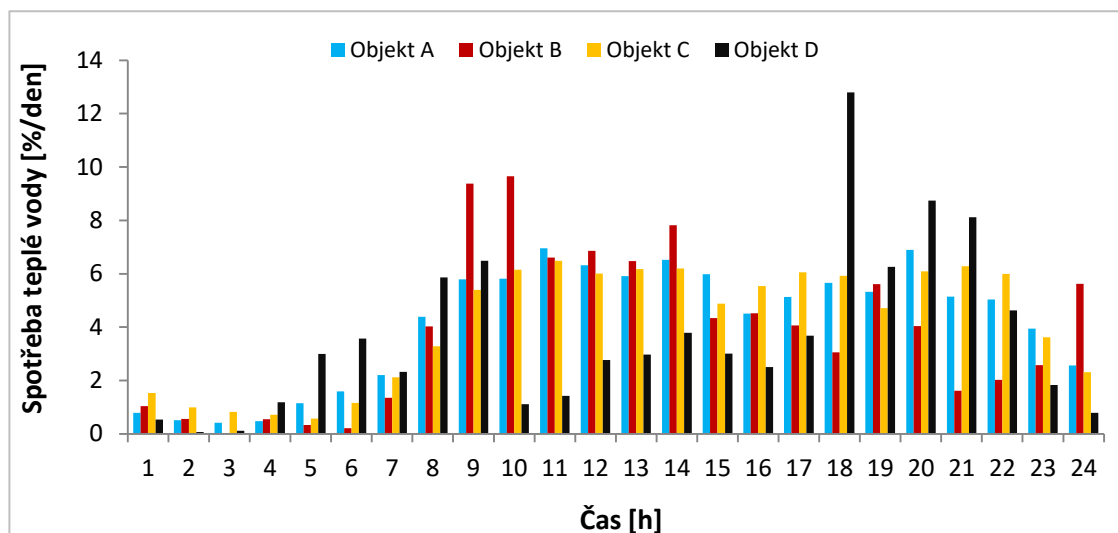
	150 l	200 l	250 l	300 l	400 l	500 l	600 l	750 l	800 l	1000 l	
Objem zásobníku	142	182	242	280	373	472	564	712	807	930	l
Výška zásobníku	1,415	1,326	1,557	1,380	1,580	1,890	1,998	1,870	1,820	2,070	m
Průměr zásobníku	0,460	0,650	0,600	0,750	0,700	0,800	0,910	0,950	1,000	1,000	m
Pozice vstupu SV	0,130	0,130	0,130	0,130	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	m
Pozice výstupu TV	1,265	1,176	1,407	1,230	1,430	1,740	1,848	1,720	1,670	1,920	m
Tepelná kapacita vody	4180	4180	4180	4180	4180	4180	4180	4180	4180	4180	J/(kg·K)
Hustota vody	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	kg/m <sup>3</sup>
Součinitel prostupu tepla	0,682	0,494	0,489	0,425	0,436	0,338	0,290	0,298	0,292	0,275	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Vodivost kapaliny	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	W/(m·K)
Pozice el. topného tělesa	0,686	0,686	0,855	0,855	0,855	1,360	1,380	1,380	1,210	1,450	m
Pozice termostatu	1,068	1,068	1,110	1,110	1,110	1,605	1,625	1,625	1,445	1,695	m
Max. výkon el. topného tělesa	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	kW
Vnitřní průměr výměníku	0,0216	0,0216	0,0216	0,0216	0,0272	0,0272	0,0272	0,0359	0,0359	0,0359	m
Vnější průměr výměníku	0,0269	0,0269	0,0269	0,0269	0,0337	0,0337	0,0337	0,0424	0,0424	0,0424	m
Plocha výměníku	0,890	1,000	1,450	1,500	1,800	2,000	2,200	2,400	2,700	3,200	m <sup>2</sup>
Délka výměníku	10,531	11,833	17,158	17,750	17,002	18,891	20,780	18,018	20,270	24,023	m
Vodivost stěny výměníku	386	386	386	386	386	386	386	386	386	386	W/(m·K)
Pozice vstupu výměníku	0,548	0,548	0,645	0,645	0,645	0,660	0,660	0,845	0,845	0,939	m
Pozice výstupu výměníku	0,168	0,168	0,195	0,195	0,195	0,200	0,200	0,290	0,290	0,290	m

Tab. 3.3-2: Parametry použitých solárních termických kolektorů

Označení	Plochý kolektor KPC 1 BP	Trubicový kolektor KTU 10	
Foto [www.eshopregulus.cz]			
Plocha kolektoru	2,00	1,81	m <sup>2</sup>
Plocha apertury	1,87	0,93	m <sup>2</sup>
Průtok	100	100	l/h
Účinnost kolektoru $\eta_0$	0,778	0,827	-
Lineární tepelné ztráty $a_1$	4,207	2,516	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Kvadratické tepelné ztráty $a_2$	0,024	0,011	W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )
Účinnost kolektoru	0,6302	0,6737	-
Pohltivost absorberu $\alpha$	0,94	0,92	-
Emisivita absorberu $\varepsilon$	0,08	0,08	-
Sklon	45	45	deg

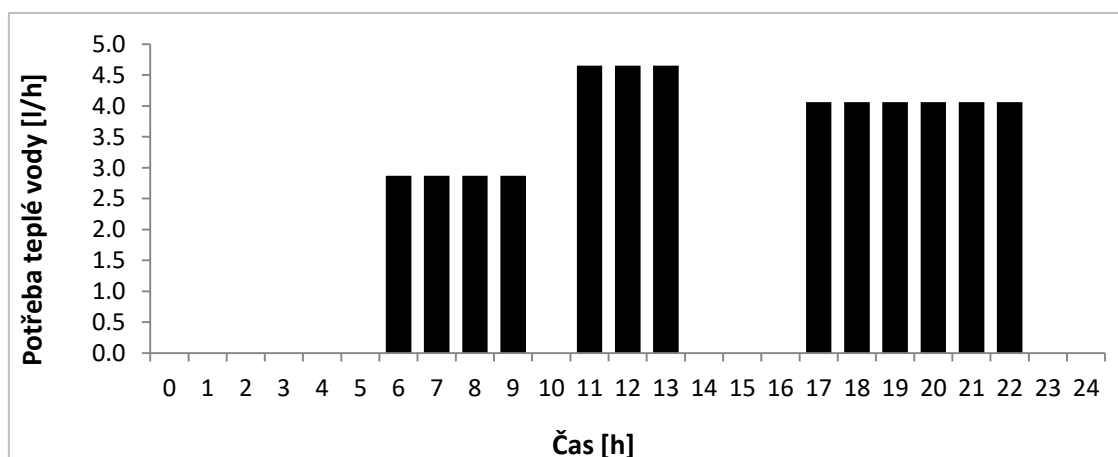
- Odběr teplé vody

Konkrétní naměřené údaje byly použity pro účely simulace solárního zásobníku.<sup>1</sup> Měření probíhalo na čtyřech bytových domech v časovém úseku dvou týdnů. Zprůměrované množství spotřebované vody všech čtyř bytových domů je zobrazeno na Obr. 3.3-10.



Obr. 3.3-10: Průměrná denní potřeba teplé vody

Denní odběr vycházel z požadavku 50 l/(os.den). Zjednodušený odběr na Obr. 3.3-11, pro pokrytí potřeb teplé vody rodinného domu, byl určen z procentuálního průměru měření (viz Obr. 3.3-10) a přepočítán denním požadavkem na jednu osobu.



Obr. 3.3-11: Navržený denní odběr teplé vody

Celkový požadovaný odběr teplé vody je určen vynásobením hodnot z Obr. 3.3-11: počtem uživatelů.

<sup>1</sup> Naměřená data odběru teplé vody z objektů A, B, C a D byla pro účely stanovení odběrové křivky poskytnuta Ing. Jakubem Vránou, Ph.D [vrana.j@fce.vutbr.cz] a Ing. Miroslavem Kucharikem [kucharik.m@fce.vutbr.cz].

## 4 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

Malá solární soustava je posuzována v rámci celoročního provozu z hlediska několika zvolených kritérií. Jedná se o využití solární zisky, poměr solárních zisků a potřebné dodané elektrické energie, poměr solárních zisků vůči tepelným ztrátám zásobníku, nejvyšší dosažené teploty kapaliny v zásobníku, tepelné ztráty zásobníku vztažených na 1 l objemu zásobníku a tepelným ztrátám zásobníku vztažených na 1 l objemu zásobníku a 1 m<sup>2</sup> apertury solárního kolektoru.

### 4.1 ROZSAH SIMULAČNÍHO ŘEŠENÍ

Porovnáno je deset solárních zásobníků tepla. Nejmenší o objemu 150 l a největší o objemu 1000 l. Solární zisky jsou dodávány plochým termickým kolektorem s plochou apertury 1,87 m<sup>2</sup>, a to v počtu jednoho až jedenácti sériově zapojených kusů (viz. Tab. 3.3-2). Solární sestava je uvažována pro pokrytí potřeby teplé vody jednoho až deseti uživatelů s předpokládaným odběrem 50 l/(os.den). Porovnání všech uvažovaných variant, je provedeno pro případ pokrytí potřeby teplé vody čtyř a šesti uživatelů (viz. Tab. 4.1-1).

Tab. 4.1-1: Varianty použité v provedených simulacích

		Celková plocha apertury solárních kolektorů [m <sup>2</sup> ]										
		1.87	3.74	5.61	7.48	9.35	11.22	13.09	14.96	16.83	18.7	20.57
Objem zásobníku [l]	150	x	x	x	x	x	x	x	x			
	200	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	250	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	300		x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	400		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	500			x	x	x	x	x	x	x	x	x
	600				x	x	x	x	x	x	x	x
	750					x	x	x	x	x	x	x
	800					x	x	x	x	x	x	x
	1000					x	x	x	x	x	x	x

Systém je navržen se dvěma zdroji tepla. Solární zisky a zisky dodané elektrickou topnou tyčí o výkonu 1,2 kW až 3,0 kW podle potřeby. Regulace soustavy zapne elektrickou topnou tyč v případě, že teplota kapaliny v době odběru klesne pod 50 °C a vypne její dodávku tepla v případě dosažení teploty 60 °C.

Modely jsou navrženy s ohledem na sledování různých výkonnostních parametrů solární soustavy s cílem vyhodnocení vlivu zásobníku na její výkon.

## 4.2 SOLÁRNÍ POKRYTÍ

Solární podíl jednotlivých variant získaných dosazením hodnot simulací z numerického modelu je zobrazen v Tab. 3.2-2. Červeně jsou vyznačeny varianty, u kterých se solární podíl pohyboval pod hranicí 50 %. Zelenou barvou varianty s podílem mezi 50 % a 60 % a černou barvou varianty, kde 60 % bylo přesaženo včetně.

Dosažení nižšího podílu je v rámci investice neekonomické. Vyšší hodnoty naopak způsobují přehřátí systému a vytváří nevyužité přebytky tepla především v letních měsících.

Nejmenší vhodný akumulační objem zásobníku pro solární podíly získané s pomocí numerického modelu (viz. Tab. 3.2-2), je stanoven v Tab. 4.2-1. Objem vzrůstal úměrně se zvětšováním kolektorové plochy a požadovaného odběru teplé vody. Výjimkou je varianta s kolektorovou plochou 3,74 m<sup>2</sup>, kde model nebyl schopen provést simulaci pro menší objem zásobníku při větším odběru. Obdobný případ nastal při kolektorové ploše 1,87 m<sup>2</sup> a 20,57 m<sup>2</sup>, avšak z důvodu funkčnosti systému, byly tyto varianty vyřazeny.

Tab. 4.2-1: Odpovídající objem solárního zásobníku v litrech v závislosti na solárním pokrytí

		Celková plocha apertury solárních kolektorů [m <sup>2</sup> ]										
		1,87	3,74	5,61	7,48	9,35	11,22	13,09	14,96	16,83	18,70	20,57
Odběr teplé vody [l/den]	50	150	150	150	150	150	200	200	200	200	200	-
	100	150	200	200	200	200	250	250	300	300	300	-
	150	150	200	200	200	250	250	250	300	300	300	400
	200	150	200	200	200	250	250	300	300	300	300	400
	250	150	200	200	200	300	300	300	300	300	400	400
	300	150	200	200	200	300	300	300	300	300	400	400
	350	150	300	200	200	300	300	300	300	300	400	400
	400	-	300	200	200	300	300	300	300	400	400	400
	450	-	300	200	200	300	300	300	300	400	400	400
	500	-	300	200	200	300	300	300	300	400	400	400

### 4.3 PODÍL SOLÁRNÍCH ZISKŮ Z CELKOVÉ POTŘEBY

Poměr dodaných solárních zisků vůči celkové energii potřebné pro udržení požadované teploty v době odběru teplé vody je zobrazen na Obr. 4.3-1 a Obr. 4.3-2. Jednotlivé křivky představují procentuální množství dodaných solárních zisků porovnávaných zásobníků v závislosti na velikosti kolektorové plochy.

Procentuální podíl solárních zisků je stanoven z poměru tepla dodaných solární soustavou vůči celkovému dodanému teplemu potřebnému k dosažení požadované teploty ohřáté kapaliny v zásobníku (4.3-1):

$$f = \frac{Q_{HX}}{Q_{HX} + Q_{el}} \cdot 100 \quad (4.3-1)$$

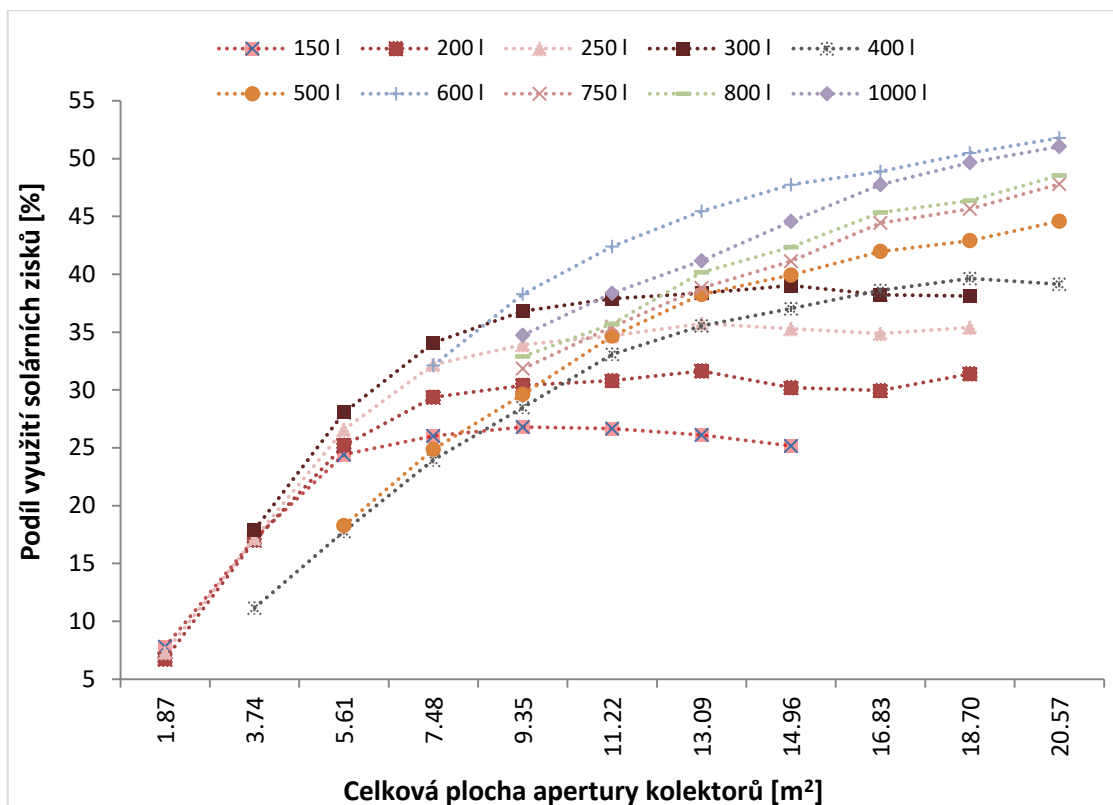
kde  $f$  podíl tepla dodaného solárním výměníkem vůči teplemu dodanému elektrickým topným tělesem [%];

$Q_{HX}$  množství tepla dodaného solárním výměníkem [kWh/rok];

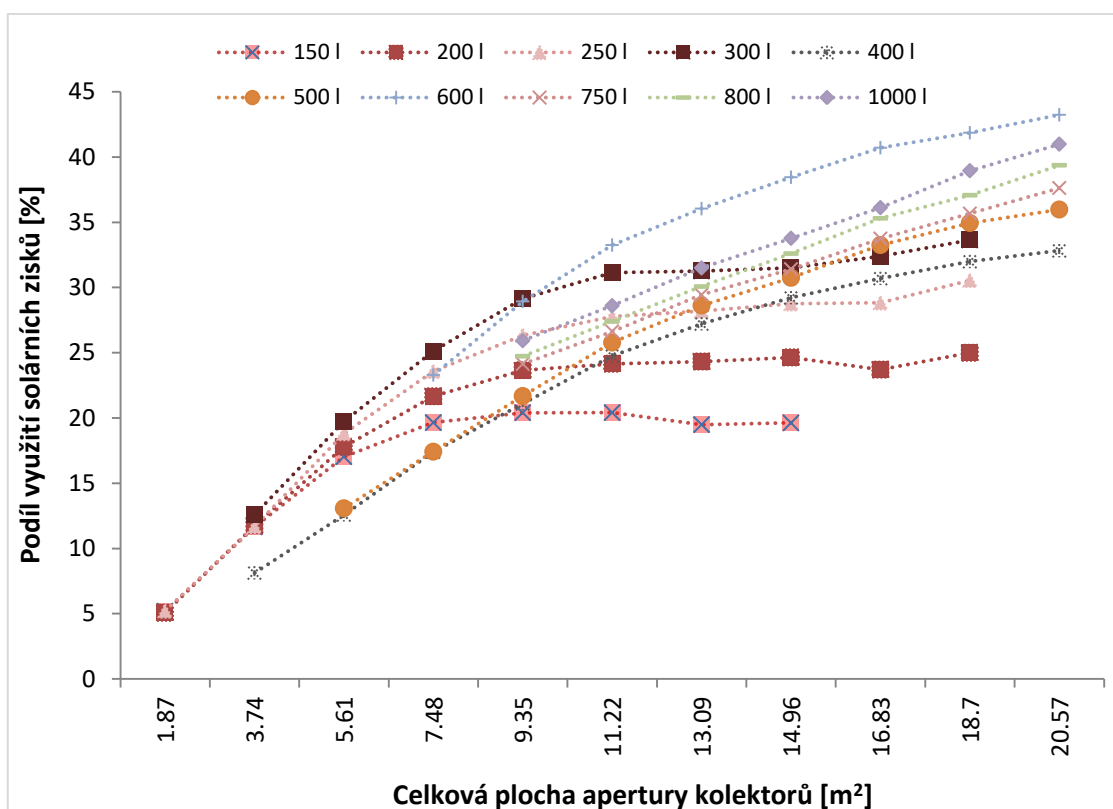
$Q_{el}$  množství tepla dodaného elektrickým topným tělesem [kWh/rok]

Malé zásobníky o objemu 150 l až 300 l dosáhly ročního podílu solárních zisků v rozsahu přibližně 26 % až 36 % pro kolektorovou plochu o velikosti 9,35 m<sup>2</sup> a i při zvětšení kolektorové plochy zhruba v těchto hodnotách daný podíl setrval. Zásobníky o objemu 400 l až 1000 l se pohybovaly v rámci ročního podílu solárních zisků v rozmezí přibližně 28 % až 38 % pro kolektorovou plochu 9,35 m<sup>2</sup> a 39 % až 52 % při kolektorové ploše 20,57 m<sup>2</sup>. V případě navýšení odběru o 100 l/den se podíl využitých solárních zisků u zásobníků do 300 l snížil o 5 % a u zásobníku od 400 l do 1000 l došlo ke snížení o 10 %.

Dosažené výsledky jsou v závislosti na celkové ploše solárního výměníku a objemu samotného zásobníku (viz. Tab. 3.3-1). Kritérium je značně ovlivněno výrobcem zásobníku, který stanoví poměr objemu zásobníku a teplosměnnou plochu solárního výměníku. Zásobník o objemu 600 l má nejvyšší poměr plochy výměníku vůči svému objemu. Z pohledu tohoto kritéria, je doporučeno navrhovat výměníky s co největší teplosměnnou plochou.



Obr. 4.3-1: Roční podíl využití solárních zisků – odběr 200 l/den



Obr. 4.3-2: Roční podíl využití solárních zisků – odběr 300 l/den

#### 4.4 TEPELNÁ BILANCE ZÁSOBNÍKU TEPLA

Tepelná bilance solárního zásobníku je vyhodnocená jako poměr dodaných ročních solárních zisků vůči tepelným ztrátám zásobníku pláštěm jeho konstrukce včetně tepla ztraceného vlivem přehřátí kapaliny (4.4-1):

$$f = \frac{(Q_{HX} - Q_{loss})}{Q_{HX}} \cdot 100 \quad (4.4-1)$$

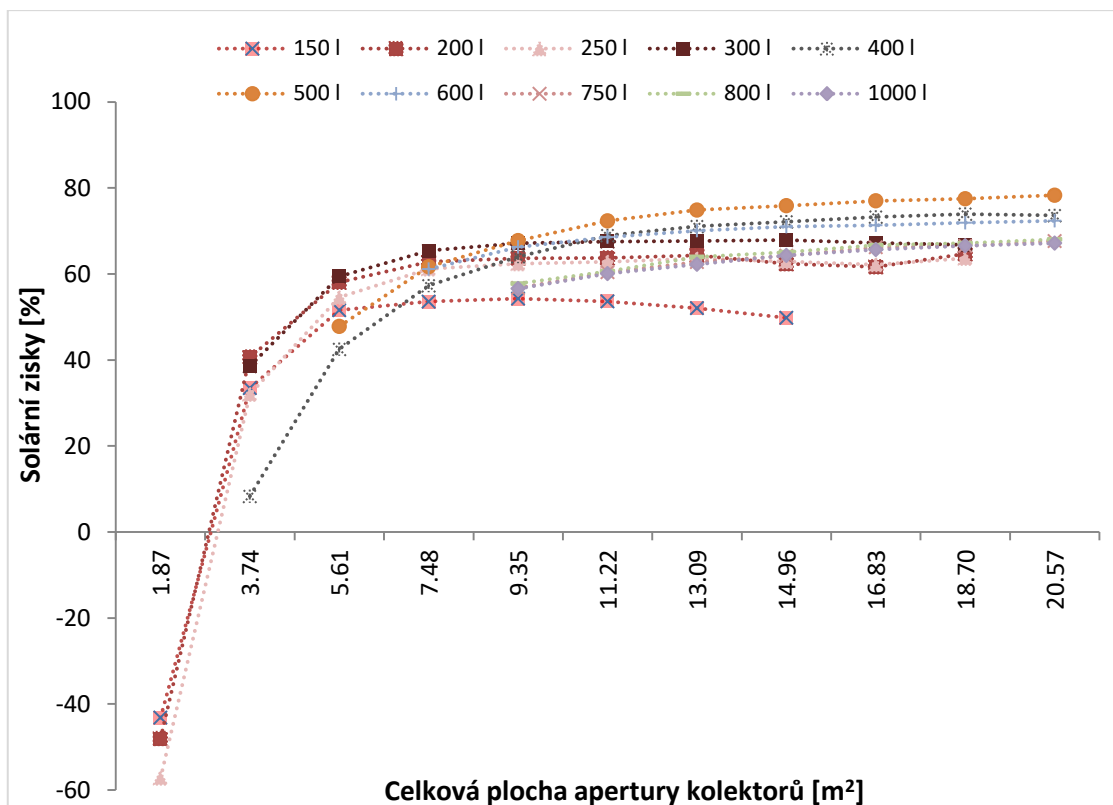
kde  $f$  podíl solárních zisků vůči tepelným ztrátám [%];  
 $Q_{HX}$  množství tepla dodaného solárním výměníkem [kWh/rok];  
 $Q_{loss}$  tepelné ztráty zásobníku [kWh/rok]

Jednotlivé křivky v grafu představují procentuální podíl ročních solárních zisků jednotlivých zásobníků v závislosti na kolektorovou plochu (Obr. 4.4-1 a Obr. 4.4-2).

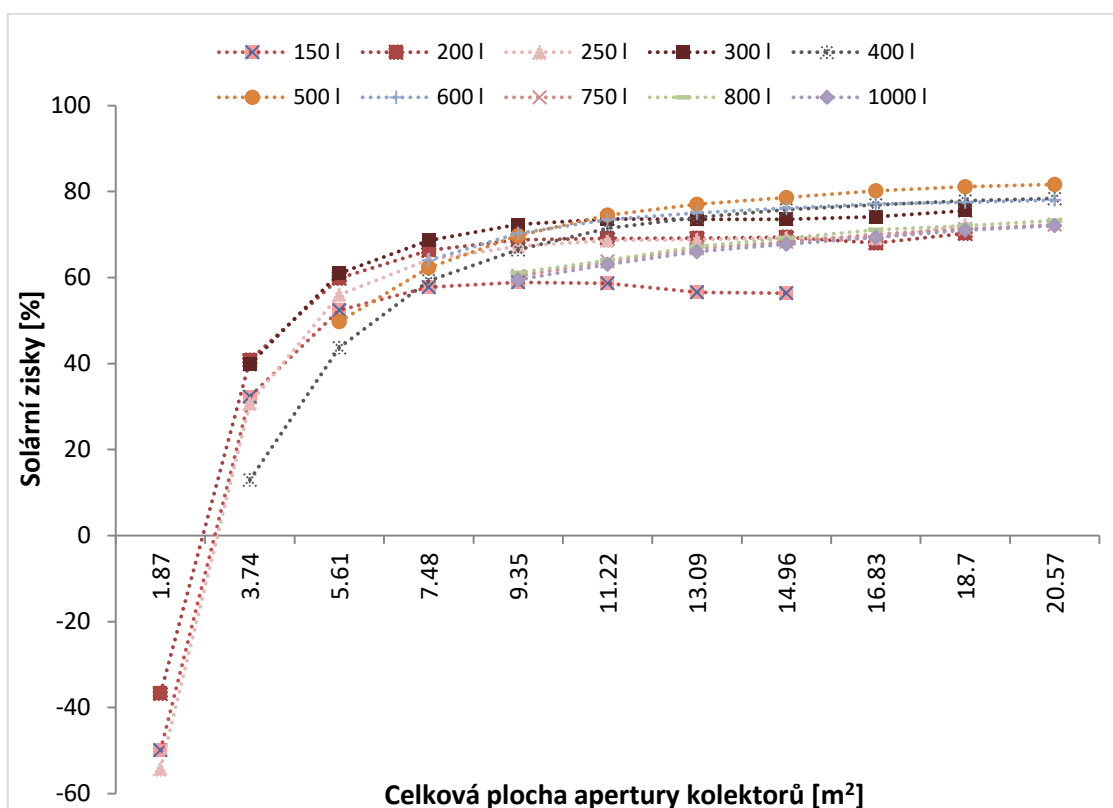
Roční tepelné ztráty zásobníku se pohybovaly v přibližném rozsahu od 1100 kWh do 2200 kWh. Dodané roční solární zisky se pohybovaly v rozsahu od 800 kWh do 8000 kWh a převážně představují 50 % až 80 % z tepelné bilance zásobníku v porovnání s tepelnými ztrátami. Rozdíl v bilanci mezi variantou s odběrem 200 l/den a variantou s odběrem 300 l/den je do 5 %.

Simulace sestavy s jedním kolektorem vykazuje zápornou hodnotu. Tato skutečnost je způsobena posouzením celoroční bilance, kdy zisky v zimních měsících dosahují nízkých hodnot, zatímco ztráty se v průběhu roku liší minimálně.

Malé zásobníky vykazují vyšší tepelné ztráty při větších kolektorových plochách, vlivem přehřátí kapaliny, což se projeví zhoršenou tepelnou bilancí.



Obr. 4.4-1: Poměr ročních solárních zisků vůči tepelným ztrátám zásobníku – odběr 200 l/den



Obr. 4.4-2: Poměr ročních solárních zisků vůči tepelným ztrátám zásobníku – odběr 300 l/den



#### 4.5 TEPELNÁ ZTRÁTA VZTAŽENÁ NA 1 LITR OBJEMU SOLÁRNÍHO ZÁSOBNÍKU

Jednotlivé zásobníky jsou porovnány na základě hodnoty roční tepelné ztráty vztažené k 1 litru jejich objemu (Obr. 4.5-1 a Obr. 4.5-2). Tepelná ztráta zahrnuje ztrátu pláštěm zásobníku do jeho okolí. Odběr teplé vody byl stanoven na 200 l/den v případě prvním a 300 l/den v případě druhém.

Roční tepelná ztráta zásobníku je stanovena pro jeden litr jeho objemu (4.5-1):

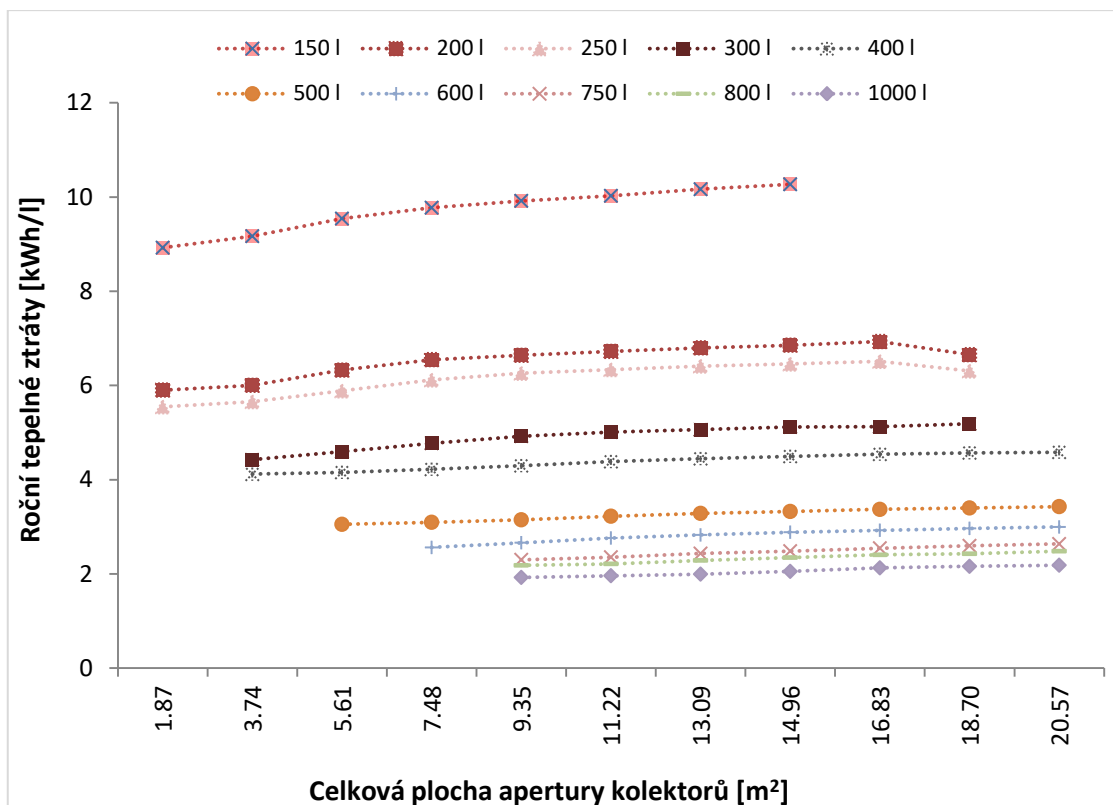
$$f = \frac{Q_{loss}}{V_z} \quad (4.5-1)$$

kde  $f$  podíl solárních zisků vůči tepelným ztrátám [kWh/l];  
 $Q_{loss}$  tepelné ztráty zásobníku [kWh/rok];  
 $V_z$  objem solárního zásobníku [l]

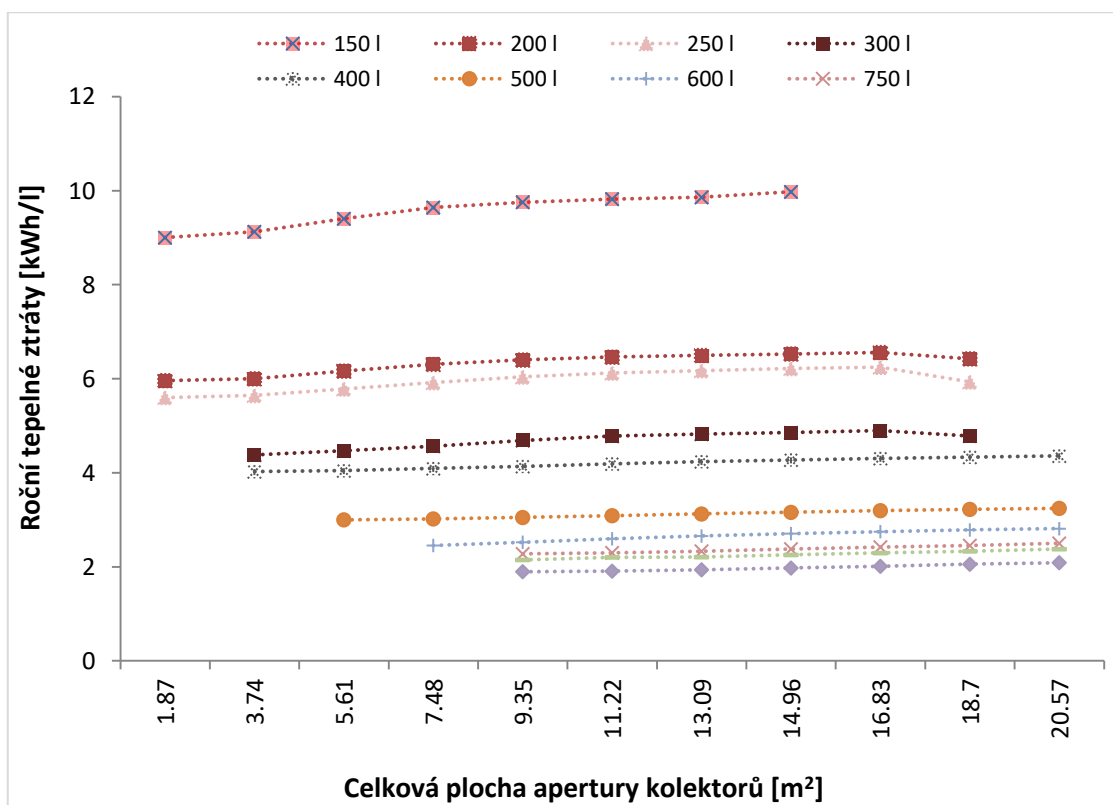
Křivky představují roční tepelnou ztrátu jednoho litru pro zvolené kolektorové plochy v rozsahu od 1,87 m<sup>2</sup> do 20,57 m<sup>2</sup>. Solární zásobníky od objemu 500 l výše se pohybují v hodnotách do 3,5 kWh/l. Menší zásobníky v rozsahu 200 l až 500 l se pohybují mezi 4 kWh/l a 7 kWh/l. Nejmenší posuzovaný zásobník o objemu 150 l dosáhl ztráty až 10 kWh/l. Navýšení odběru o 100 l/den snížilo tepelnou ztrátu o zhruba 0,2 kWh/l u menších zásobníků a 0,1 kWh/l u zásobníků s větším akumulačním objemem.

Malé zásobníky vykazují vyšších hodnot tepelných ztrát, z důvodu malé akumulační kapacity. Z pohledu tohoto kritéria jsou výhodnější zásobníky větších objemů.

Součinitele prostupu tepla hodnocených zásobníků jsou uvedeny v Tab. 3.3-1.



Obr. 4.5-1: Roční tepelné ztráty zásobníku vztažené na 1 l objemu ohřívání kapaliny – odběr 200 l/den



Obr. 4.5-2: Roční tepelné ztráty zásobníku vztažené na 1 l objemu ohřívání kapaliny – odběr 300 l/den

#### 4.6 TEPELNÉ ZTRÁTY VZTAŽENY NA 1 LITR OBJEMU ZÁSOBNÍKU A 1 M<sup>2</sup> KOLEKTOROVÉ PLOCHY

Velikost kolektorové plochy ovlivňuje tepelný zisk dodaný solárnímu zásobníku. Množství akumulovaného tepla závisí na objemu kapaliny nacházející se v zásobníku. Implementováním těchto parametrů vztažených na jednu jednotku dosáhneme obecného předpokladu velikosti tepelné ztráty zásobníku na jeden litr jeho objemu při kolektorové ploše 1 m<sup>2</sup> (Obr. 4.6-1 a Obr. 4.6-2).

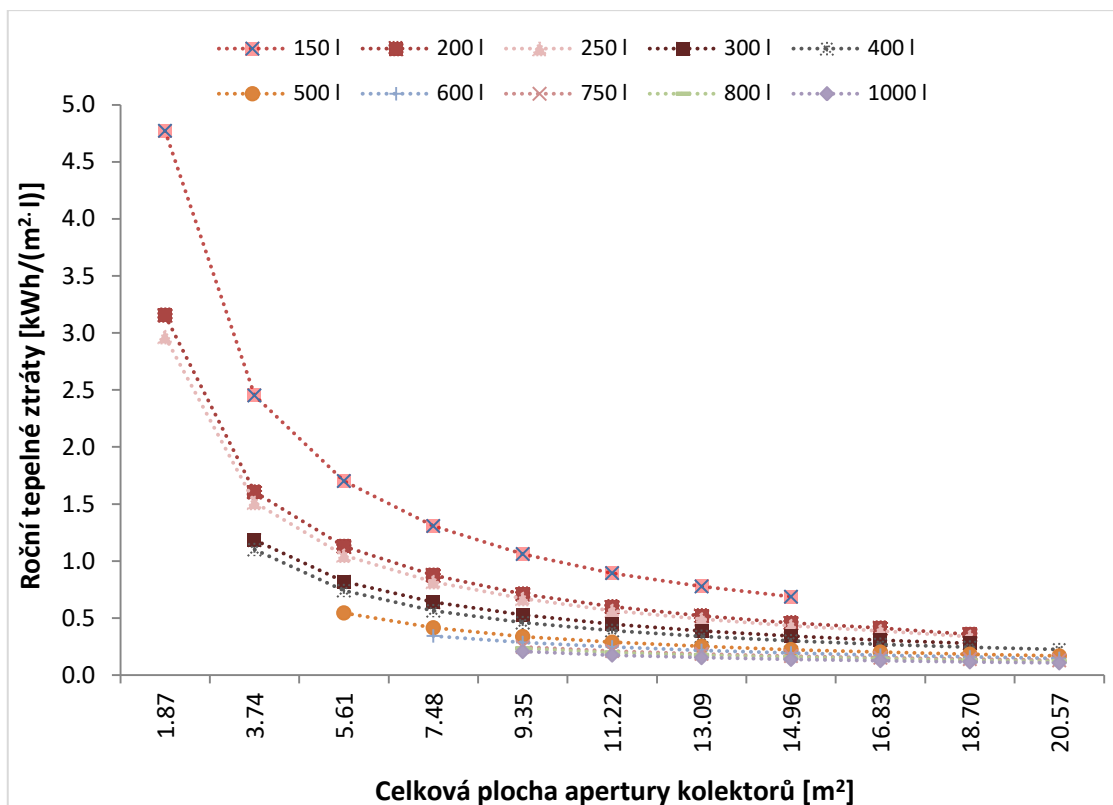
Roční tepelná ztráta zásobníku je vztažena k jednomu litru jeho objemu a 1 m<sup>2</sup> kolektorové plochy dodávající energii (4.6-1):

$$f = \frac{Q_{loss}}{(V_z \cdot A_p)} \quad (4.6-1)$$

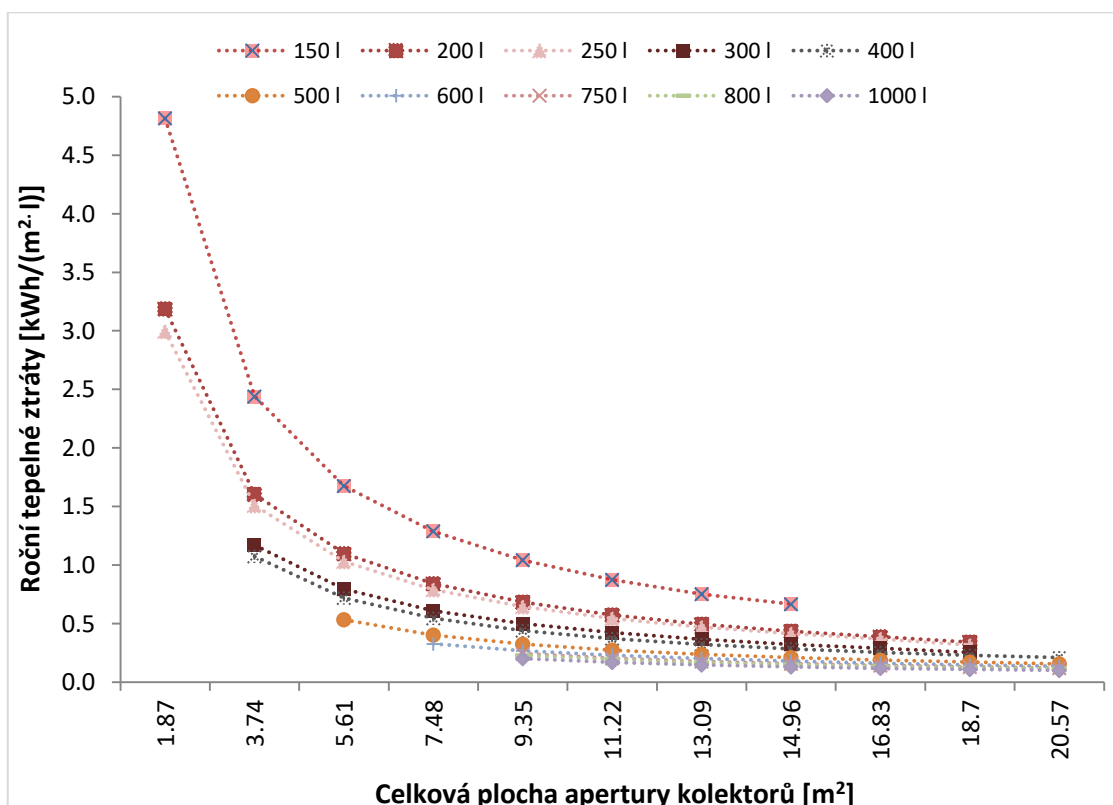
kde  $f$  podíl solárních zisků vůči tepelným ztrátám [kWh/(m<sup>2</sup>·l)];  
 $Q_{loss}$  tepelné ztráty zásobníku [kWh/rok];  
 $V_z$  objem solárního zásobníku [l];  
 $A_p$  celková plocha apertury kolektorů [m<sup>2</sup>]

U zásobníků s velkým objemem je vliv velikosti kolektorové plochy zanedbatelný. Tepelná ztráta se pro zásobníky o objemu 500 l až 1000 l pohybovala v rozmezí od 0,10 do 0,55 kWh/(m<sup>2</sup>·l). Rozsah tepelné ztráty je platný pro provedené varianty simulace. Tedy od plochy 5,61 m<sup>2</sup> až 20,57 m<sup>2</sup>. U zásobníků s malým objemem je křivka tepelné ztráty exponenciální. Hodnota roste se snižováním velikosti kolektorové plochy. Navýšení odběru o 100 l/den snížilo tepelnou ztrátu o přibližně 0,02 kWh/l u menších zásobníků a 0,01 kWh/l u zásobníků s větším akumulačním objemem.

Stejně jako v předchozím kritériu, vychází i zde, že tepelné ztráty rostou s klesajícím objemem zásobníku.



Obr. 4.6-1: Roční tepelné ztráty zásobníku vztahované na 1 l ohříváné kapaliny a 1 m<sup>2</sup> apertury solárního kolektoru – odběr 200 l/den



Obr. 4.6-2: Roční tepelné ztráty zásobníku vztahované na 1 l ohříváné kapaliny a 1 m<sup>2</sup> apertury solárního kolektoru – odběr 300 l/den

## 4.7 TEPLOTA KAPALINY V ZÁSObNÍKU

Jednotlivé varianty byly posouzeny i z hlediska dosažené teploty kapaliny (Obr. 4.7-1 a Obr. 4.7-2). Maximální provozní teplota byla zvolena s ohledem na jednotlivé prvky sestavy, pro zajištění jejího správného chodu a ochrany dílčích zařízení a armatur.

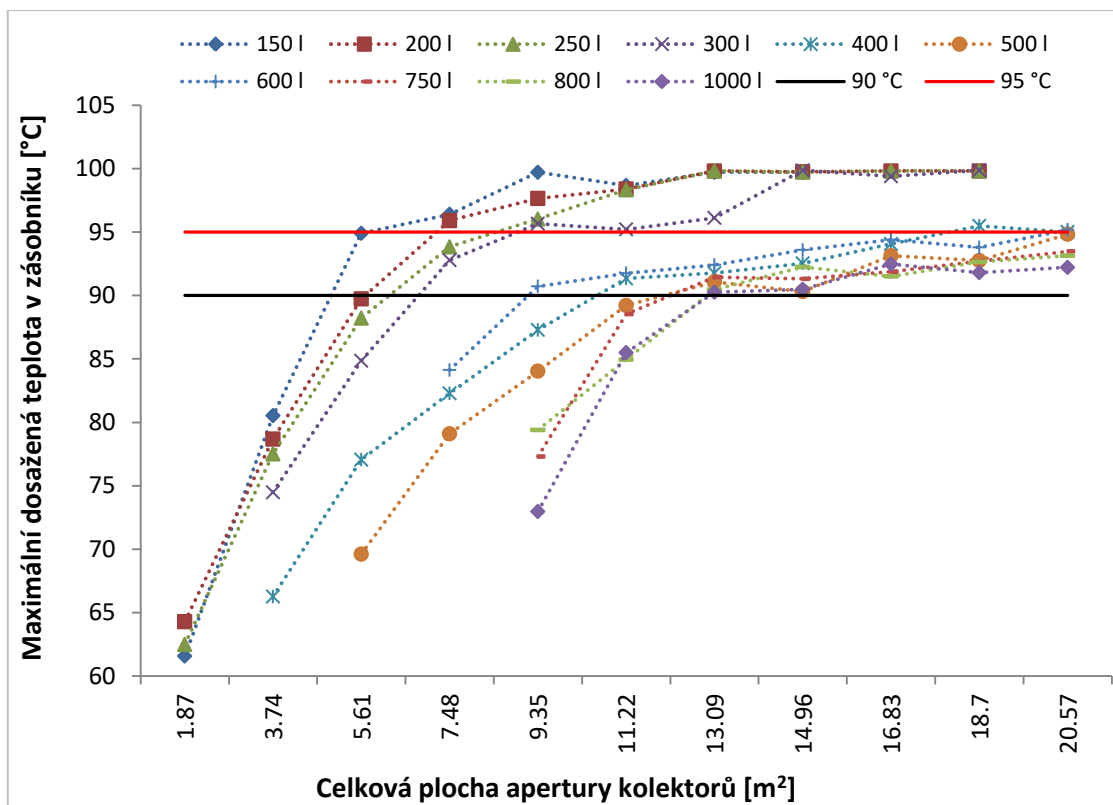
Výrobce udává maximální provozní teplotu solárního zásobníku 95 °C. Malé zásobníky do 200 l překročily tuto teplotu při velikosti kolektorové plochy 7,48 m<sup>2</sup>, do 300 l pak při kolektorové ploše 9,35 m<sup>2</sup>. Zásobníky větších objemů si držely maximální teplotu pod touto hranicí. Výjimkou byl 400 l zásobník, který překročil hranici při ploše kolektorů 18,7 m<sup>2</sup>.

Množství kapaliny v zásobníku, které lze ohřát 1 m<sup>2</sup> kolektorové plochy, je posouzeno pro teplotu 90 °C a 95 °C (Tab. 4.7-1). Teplota 90 °C je o 5 K nižší než maximální provozní teplota samotného zásobníku a může být dosažena v běžném provozu, bez rizika poškození solární sestavy. Všechny posuzované varianty se v rámci překročení provozní teploty systému pohybovaly poměrem okolo 20 - 35 l/m<sup>2</sup>. Hodnoty v Tab. 4.7-1 pro jednotlivé zásobníky a teploty jsou dány interpolací výsledků z grafu na Obr. 4.7-1.

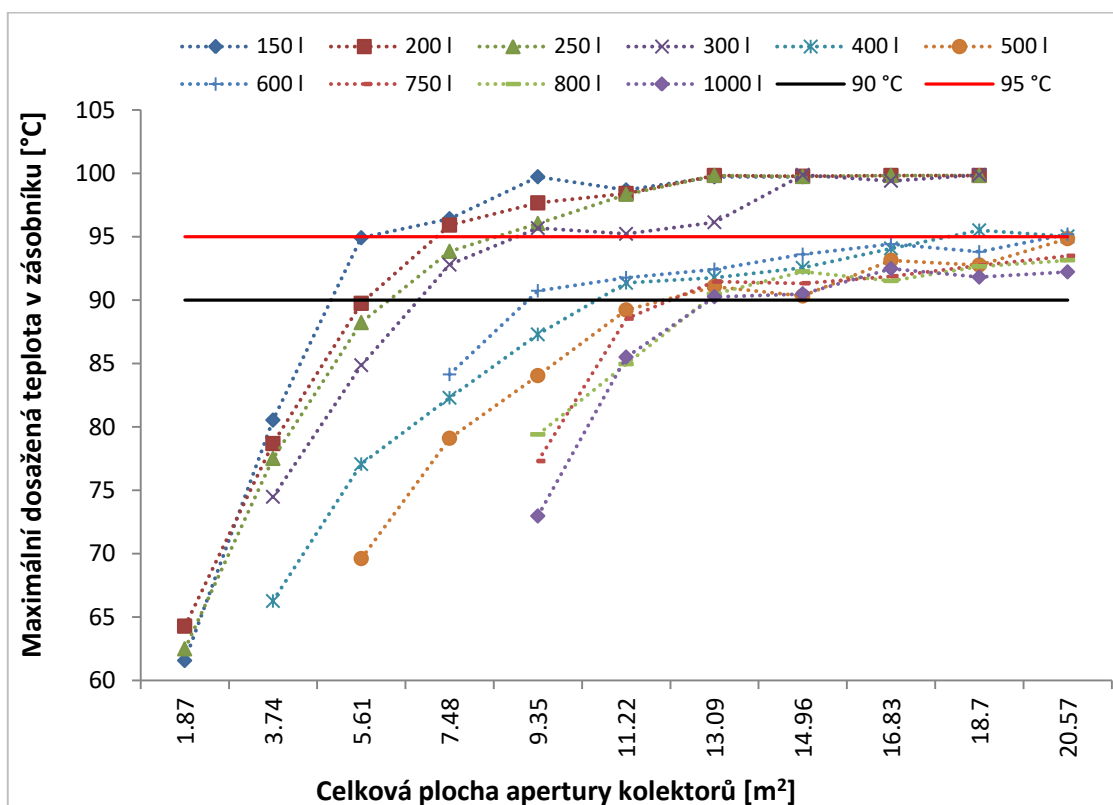
Tab. 4.7-1: Množství kapaliny v zásobníku ohřáté 1 m<sup>2</sup> kolektorové plochy při dosažení teplot 90 °C a 95 °C

150	200	250	300	400	500	600	750	800	1000	I
dosažení teploty 95 °C										
4,93	6,59	8,14	8,38	17,61	25,06	19,69	24,74	26,49	28,77	m <sup>2</sup>
30	30	31	36	23	20	30	30	30	35	l/m <sup>2</sup>
dosažení teploty 90 °C										
4,53	5,78	6,06	6,39	10,15	11,77	8,50	11,85	12,26	12,30	m <sup>2</sup>
33	35	41	47	39	42	71	63	65	81	l/m <sup>2</sup>

Pravidlo 50 - 80 l/m<sup>2</sup> akumulace pro přípravu teplé vody lze aplikovat bez rizika přehřátí kapaliny na zásobníky větších objemů, které mají hranici přehřátí pod 30 l/m<sup>2</sup>. Nejvyšší riziko přehřátí je u malých zásobníků, kdy se poměr ohřívání objemu a kolektorové plochy blíží k hranici 30 l/m<sup>2</sup> již při malých kolektorových plochách, konkrétně do 10 m<sup>2</sup>. Výsledné hodnoty jsou platné pro zvolené vstupní parametry provedené simulace. Hodnoty mohou být v praxi odlišné. Důležitým faktorem je konstrukční řešení zásobníku.



Obr. 4.7-1: Nejvyšší dosažená teplota ohříváné kapaliny v solárním zásobníku – odběr 200 l/den



Obr. 4.7-2: Nejvyšší dosažená teplota ohříváné kapaliny v solárním zásobníku – odběr 300 l/den

## ZÁVĚR

Disertační práce je zaměřena na optimalizaci návrhu solárního zásobníku tepla malé solární soustavy. Zhodnocení přístupu a současných pravidel návrhu solárních zásobníků a potvrzení či vyvrácení jejich vhodnosti prostřednictvím numerického modelování.

Vytvořený numerický model v softwaru TRNSYS byl verifikován s ručním normovým výpočtem a validován s experimentálním měřením provedeném na reálné solární soustavě umístěné v areálu Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně, za účelem jeho správného nastavení.

Pro vyhodnocení efektivního návrhu z pohledu zvolených kritérií byly provedeny energetické simulace pro deset zásobníků v rozsahu 150 l až 1000 l. Solární energie je dodána soustavě kolektorovou plochou o velikosti 1,87 m<sup>2</sup> až 20,57 m<sup>2</sup>. Parametry použitých zařízení byly převzaty z technické dokumentace výrobců. Model byl vytvořen v simulačním nástroji TRNSYS.

Solární zásobníky byly v rámci disertační práce posouzeny z hlediska podílu využitých solárních zisků, tepelné bilance, maximálních dosažených teplot, tepelných ztrát v závislosti na jednotce objemu a kolektorové plochy a solárního podílu. Uvedené veličiny byly stanoveny jako klíčové pro efektivní návrh solárního zásobníku.

Roční solární zisky pokrývají až 65 % potřeby na ohřev teplé vody. Zbývající potřeba je dodána druhým zdrojem tepla. Poměr je ovlivněn akumulacním objemem solárního zásobníku a celkovým odběrem teplé vody. Navýšením odběru o 100 l/den poklesl podíl solárních zisků o 5 % u zásobníků do 400 l a o 10 % u zásobníků větších akumulacních objemů.

Tepelná bilance představuje poměr dodaných solárních zisků vůči tepelným ztrátám zásobníku. Zisky v rámci tepelné bilance solárního systému představují 50 - 80 %. Zásobníky středního akumulacního objemu, 300 l až 600 l, dosáhly nejvyšších procentuálních zisků. Menší zásobníky neposkytují dostatečný akumulacní objem pro efektivní využití. Větší zásobníky představují vyšší tepelné ztráty do okolního prostředí a současně vyžadují vyšší výkon k ohřátí jejich celého objemu pro zajištění požadované teploty.

Tepelné ztráty solárních zásobníků vztažených na 1 litr jejich akumulacního objemu a současně na 1 m<sup>2</sup> kolektorové plochy rostou s klesajícím objemem. Tato skutečnost je dosažena vlivem zahrnutí nevyužitého tepla do tepelných ztrát zásobníku. Hodnota tepelné ztráty se pohybuje mezi 2 - 10 kWh/l. Malé zásobníky dosahují vyšších tepelných ztrát vlivem nedostatečného akumulacního objemu, kdy velké množství potenciálních solárních zisků je uvolněno do okolního prostoru.

Pro vyhodnocení zásobníku tepla z pohledu přehřívání kapaliny, je zásadní maximální zvolená teplota, kterou je povoleno dosáhnout. Čím nižší maximální teplota bude zvolena, tím větší akumulační objem je zapotřebí. Nejrychlejší nárůst teploty v zásobníku je patrný u menších objemů.

#### ▪ Shrnutí výsledků do technické praxe

Současný koncept návrhu objemu solárního zásobníku platný v České republice i v zahraničí vychází z pravidla 50 - 80 l/m<sup>2</sup>. Výrobci solárních sestav uvádí v projekčních podkladech tzv. nepsaná pravidla dimenzování akumulačních zásobníků. Solární ohřev teplé vody pro jedno- a dvougenerační rodinné domy stanovuje jako 1 - 1,5 m<sup>2</sup> kolektorové plochy na jednu osobu a objem zásobníku jako 1,5 - 2 x denní potřeba teplé vody, minimálně však 50 l/m<sup>2</sup> kolektorové plochy. U větších obytných domů 1 m<sup>2</sup> kolektorové plochy na bytovou jednotku a 30 - 80 l/m<sup>2</sup> kolektorové plochy. Toto pravidlo se na základě provedených simulací projevilo jako vhodný způsob návrhu i v případě solárních zásobníků menších objemů. Všechny zásobníky poukazují, že se hranice přehřátí kapaliny pohybuje okolo 25 - 30 l/m<sup>2</sup> poměru objemu ohřívání kapaliny a velikosti kolektorové plochy. Především v případě malých zásobníků hrozí riziko přehřátí při předimenzování kolektorové plochy, oproti zásobníkům větších objemů, které reagují na předání tepla z kolektorové plochy pomaleji. V běžném provozu, při dodržení pravidla 50 - 80 l/m<sup>2</sup>, k problémovým stavům nedojde. Mohou však nastat v případě omezení odběru vyrobeného tepla z důvodu dlouhodobější nepřítomnosti. Pro tento případ, je potřeba navrhnout vhodná opatření. Například zakrytí plochy solárních kolektorů nebo zajištění uvolnění již vyrobeného tepla.

Solární pokrytí pro ohřev teplé vody by se měl podle doporučení pohybovat okolo 60 % pro malé systémy a 30 - 45 % pro středně velké systémy. Solární pokrytí nad 60 % je dosaženo při návrhu minimálně 1 m<sup>2</sup> kolektorové plochy na odběr teplé vody 50 l/den.

Zpracovaná data byla porovnána s výsledky českých a zahraničních autorů. Matuška navrhuje ve svých publikacích objem solárního zásobníku tepla pro běžnou potřebu teplé vody 30 - 50 l/(os.den) a celkovou plochu solárních kolektorů 2 - 6 m<sup>2</sup> v rozmezí 200 - 500 l. Knudsen vycházel při návrhu objemu solárního zásobníku z potřeby teplé vody 100 l/den. Jeho výzkum došel k závěru, že ideální objem zásobníku z energetického hlediska je 150 l. Nejčastěji volené a instalované zásobníky tepla jsou o objemu 200 l a 300 l. Vzhledem k běžné potřebě teplé vody do 200 l/den, jež byla stanovena průzkumem denní potřeby teplé vody jednogeneračních rodinných domů v Dánsku, byl určen jako ideální objem zásobníku teplé vody 100 - 175 l. Energy saver navrhuje akumulační objem solárního zásobníku 200 - cca 400 l pro 2 - 6 uživatelů, s předpokladem objemu přibližně 60 l/m<sup>2</sup> kolektorové plochy a 80 l/m<sup>2</sup> kolektorové plochy pro oblasti s vysokou intenzitou solárního záření.



Dosavadní poznatky a postupy návrhu akumulačního objemu solárních zásobníků lze prostřednictvím simulací vyhodnotit jako korektní. Vhodné se ukazuje dodržení pravidla akumulace 50 - 80 l/m<sup>2</sup>. Větší objemy akumulace se jeví jako neekonomické. Menší objemy akumulace mohou způsobit přehřátí solární soustavy, především v letním období, a následné poškození komponentů okruhu. Návrh akumulačního objemu by neměl klesnout pod 30 l/m<sup>2</sup>, právě z důvodu rizika přehřátí.

- Poznatky pro budoucí výzkum

Důležitým faktorem pro návrh solárního ohřevu teplé vody je znát předpokládaný odběr teplé vody. Norma ČSN 06 0320 udává hodnotu spotřeby teplé vody 82 l/(os.den) pro bytové prostory. Norma ČSN EN 12 831 uvádí rozmezí 25 - 100 l/(os.den) v závislosti na náročnosti uživatele. Vzhledem ke snaze šetřit energií by bylo vhodné provést rozsáhlá měření na objektech a stanovení aktuálnějších hodnot odběrů teplé vody pro ucelnější a efektivnější návrh systémů přípravy teplé vody a jejich odběrových křivek. Přesnější znalosti spotřeb teplé vody z reálných objektů by umožnilo konkrétnější nastavení simulačních modelů energetické bilance solárních soustav. Specialisté z oboru zatím nemají jednoznačné stanovisko ke spotřebě teplé vody. Hodnoty stanovené normou nejsou schopny promítnout skutečné chování uživatele. Praxe poukazuje na velké rozdíly ve spotřebě teplé vody mezi jednotlivými odběrateli. Například v Dánsku je předpokládaná spotřeba teplé vody o polovinu nižší než v České republice.

Použitá meteorologická data znatelně ovlivňují výsledky simulací. Vzhledem k neustále probíhajícím změnám v počasí a celosvětovému globálnímu oteplování jsou pro autentičnost výsledků simulací potřebné několikaleté průměry naměřených klimatických dat. Výsledná meteorologická data by měla obsahovat globální a difuzní solárního záření, venkovní teplotu, směr a rychlost větru, atmosférický tlak, relativní a měrnou vlhkost a teplotu rosného bodu. Nejpřesnější návrh a ověření solárního systému je dosažen použitím klimatických dat ze stejné či blízké lokality.

Při vytváření modelů za účelem provádění simulací by se neměly zanedbávat rozvody potrubí. Přestože se dbá na tepelné zaizolování všech dostupných částí kapalinových systémů, stále dochází ke ztrátám tepla do okolních prostorů. Tyto ztráty nejsou v návrhu systémů zanedbatelné, pokud se chceme co nejvíce blížit skutečnosti. Obzvláště využíváme-li k návrhu výpočtové nástroje. Výpočet celoroční bilance tepelné ztráty potrubí solárního okruhu je poměrně komplikovaný, vzhledem ke vstupu mnoha proměnných parametrů. Bylo by vhodné se touto problematikou podrobněji zabývat.

Vzhledem k současnému trendu úspor energií a snižování spotřeby teplé vody se trh přiklání k zásobníkům menších akumulačních objemů, i ve smyslu úspory prostoru. Problémem těchto solárních zásobníků je vyšší riziko přehřívání kapaliny a tudíž ztráty tepla formou stagnace systému a možné poškození solární soustavy vlivem překročení maximální operační teploty jejích jednotlivých součástí. Jelikož teplota solárního systému

může při stagnaci dosáhnout až okolo 200 - 300 °C podle typu solárního kolektoru a většina zařízení solární soustavy včetně samotného zásobníku tepla má maximální operační teplotu okolo 95 °C, bylo by vhodné zdokonalit konstrukční řešení těchto komponent, tak aby byla schopná odolávat i teplotám vyšším.

Výrobci solárních zásobníků v technických listech uvádí jejich parametry, avšak rozsah těchto parametrů je nesourodý. Některé parametry potřebné jako vstupní data pro simulace či posouzení solárního systému tedy často nejsou uvedeny a musí se obtížně dohledávat. Ucelenější dokumentace výrobků by přinesla užitek nejen projektantům, ale také výzkumníkům z dané oblasti.

Posouzení či návrh soustavy je často provedeno prostřednictvím simulačního softwaru. Trh poskytuje poměrně rozsáhlou nabídku těchto výpočetních nástrojů. Některé jsou zaměřeny na konkrétní systémy technického zařízení budov. Jejich používání však nezajišťuje dosažení stoprocentních výsledků. Uživatelé nejsou seznámeni se všemi matematicko-fyzikálními vzorci, stejně tak postupy a jejich souvislostmi, které se v pozadí daného softwaru odehrávají. Pro zajištění kvalitnějších výsledků je vhodné vytvořit si vlastní výpočetní nástroj, jehož pozadí je uživateli zcela znám.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Internetový portál: <http://sbi.dk/en/bsim>.
- [2] Internetový portál: <http://kcad.cz/cz/uvod/>.
- [3] Internetový portál: <http://www.trnsys.com/>.
- [4] Internetový portál: <http://www.solardesign.co.uk/tsol.php>.
- [5] Obnovitelné zdroje. Akumulační zásobníky allstor VPS/2 - Modul: Akumulační zásobníky. Dostupné na: <https://docplayer.cz/5905325-Obnovitelne-zdroje-akumulacni-zasobniky-allstor-vps-2-modul-akumulacni-zasobniky-verze-02-allstor-vps-300-2-2000-2-01-e3.html>.
- [6] Fotovoltaika, fototermika – Kapitola 13: *Navrhování a bilancování solárních soustav*. Dostupné na: <https://publi.cz/books/91/13.html>.
- [7] SUKHATME, S. P.: *Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage – second edition*, McGraw-Hill Education, India 2006, ISBN 0070142963. Dostupné na: <https://books.google.cz/books?id=l-XHcwZo9XwC&pg=PA62&lpg=PA62&dq=1367+w/m2&source=bl&ots=ZAb0WXOyO8&sig=ACfU3U2yb-EK3dP73ouSnEdm9-yCrdhDIQ&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwiM3ITsqf3jAhXXgVwKHbWPBfAQ6AEwB3oECAgQAQ#v=onepage&q=1367%20w%2Fm2&f=false>.
- [8] Internetový portál: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/czech-republic>.
- [9] PINEL, P.; CRUICKSHANK, C. A.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I.; WILLS, A.: *A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications*. Publikováno v: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(7), pp. 3341-3359, 2011. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.013>.
- [10] DINCER, I.; DOST, S.: *A perspective on thermal energy storage systems for solar energy applications*. Publikováno v: *International Journal of Energy Research* 20 (6), pp. 547-557, 1996. Dostupné na: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(199606\)20:6%3C547::AIDER173%3E3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(199606)20:6%3C547::AIDER173%3E3.0.CO;2-S).
- [11] FATH, H. E. S.: *Technical assessment of solar thermal energy storage technologies*. Publikováno v: *Renewable Energy* 14, pp. 35-40, 1998. Dostupné na: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00044-5).
- [12] LI, S.; ZHANG, Y.; LI, Y.; ZHANG, X.: *Experimental study of inlet structure on the discharging performance of a solar water storage tank*. Publikováno v: *Energy and Buildings* 70, pp. 490-496, 2014. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.086>.
- [13] SHAH, L. J.; FURBO, S.: *Entrance effects in solar storage tanks*. Publikováno v: *Solar Energy* 75, pp. 337-348, 2003. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.04.002>.

- [14] KENJO, L.; INARD, C.; CACCAVELLI, D.: *Experimental and numerical study of thermal stratification in a mantle tank of a solar domestic hot water system*. Publikováno v: Applied Thermal Engineering 27, pp. 1986-1995, 2007. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.008>.
- [15] FURBO, S.; ANDERSEN, E.; KNUDSEN, S.; VEJEN, N. K.; SHAH, L. J.: *Smart solar tanks for small domestic hot water systems*. Publikováno v: Solar Energy 78, pp. 269-279, 2005. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.022>.
- [16] SHIN, M.; KIM, H.; JANG, D.; LEE, S.; LEE, Y.; YOON, H.: *Numerical and experimental study on the design of a stratified thermal storage system*. Publikováno v: Applied Thermal Engineering 24, pp. 17-27, 2004. Dostupné na: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00242-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00242-4).
- [17] FURBO, S.; KNUDSEN, S.: *Improved design of mantle tanks for small low flow SDHW systems*. Publikováno v: International Journal of Energy Research 30, pp. 955-965, 2006. Dostupné na: <https://doi.org/10.1002/er.1197>.
- [18] DEGHAN, A. A.; BARZEGAR, A.: *Thermal performance behavior of a domestic hot water solar storage tank during consumption operation*. Publikováno v: Energy Conversion and Management 52, pp. 468-476, 2011. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.075>.
- [19] LI, S.; ZHANG, Y.; ZHANG, K.; LI, X.; LI, Y.; ZHANG, X.: *Study on performance of storage tanks in solar water heater system in charge and discharge progress*. Publikováno v: Energy Procedia 48, pp. 384-393, 2014. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.045>.
- [20] KNUDSEN, S.: *Consumers' influence on the thermal performance of small SDHW systems - theoretical investigations*. Publikováno v: Solar Energy 73, pp. 33-42, 2002. Dostupné na: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00018-X).
- [21] Energy saver. *Everything you wanted to know about solar water heating systems*. Dostupné na: <https://www.energy.gov/energysaver/articles/everything-you-wanted-know-about-solar-water-heating-systems>.
- [22] CIHELKA, J.: *Sluneční vytápěcí systémy*, SNTL, Praha 1984.
- [23] KRAMOLIŠ, P.: *Zásobníky tepla*, 2004. Dostupné na: <http://www.tzb-info.cz/1950-zasobniky-tepla>.
- [24] MATUŠKA, T.: *Solární zásobníky*. Dostupné na: <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/solarni-zasobniky>.
- [25] MATUŠKA, T.: *Solární zařízení v příkladech*, Grada Publishing, Praha 2013, ISBN 978-80-247-3525-2.
- [26] MATUŠKA, T.: *Alternativní zdroje energie*. Praha 2010.
- [27] ČSN EN 15316-3-3. *Tepelné soustavy v budovách - Výpočtová metoda pro stanovení energetických potřeb a účinností soustavy - Soustavy teplé vody, příprava*, 2010.
- [28] ČSN 06 0320. *Tepelné soustavy v budovách - Ohřívání užitkové vody - Navrhování a projektování*, 2006.

- [29] ČSN EN 12 831-1. *Energetická náročnost budov – Výpočet tepelného výkonu – Část 1: Tepelný výkon pro vytápění*, 2018.
- [30] Internetový portál: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/36-medene-trubky>.
- [31] Internetový portál: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/37-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-kovu>.
- [32] Vyhláška č. 193/2007 Sb., kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu.
- [33] RÁŽ, J. V.: *Izolace potrubí podle evropských doporučení*. Dostupné na: <https://vytapieni.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vytapieni/7459-izolace-potrubu-podle-evropskych-doporuceni>.
- [34] TUČEK, J.: *Výpočet tepelných ztrát a izolace potrubí*. Bakalářská práce, 2011. Dostupné na: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=33854](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=33854).
- [35] VYHLÍDALOVÁ, K.; HORÁK, P.: *Vliv tepelné ztráty na energetickou bilanci solární soustavy*. Dostupné na: <https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/18405-vliv-tepelne-ztraty-potrubu-na-energetickou-bilanci-solarni-soustavy>.
- [36] VYHLÍDALOVÁ, K.; HORÁK, P.: *Modelling of a small solar collector array and comparison with meteorological data using TRNSYS energy simulation software*. Publikováno v: Advanced Materials Research Vol.1041, Trans Tech Publications, Švýcarsko 2014, ISBN 1662-8985. Dostupné na: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.109>.
- [37] TNI 73 0302. *Energetické hodnocení solárních tepelných soustav – Zjednodušený výpočtový postup*, 2014.
- [38] MATUŠKA, T.: *Zjednodušená bilance solárního kolektoru*. Dostupné na: <https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/7115-zjednodusena-bilance-solarniho-kolektoru>.
- [39] TRNSYS 16 a TRaNsient SYstem Simulation program. *Volume 5: Mathematical References*. Dostupné na: <http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/05-MathematicalReference.pdf>.
- [40] NORTON, B.: *Solar energy*. Publikováno v: Thermopedia<sup>TM</sup>, A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat & Mass Transfer, and Fluids Engineering, 2011. Dostupné na: [https://doi.org/10.1615/AtoZ.s.solar\\_energy](https://doi.org/10.1615/AtoZ.s.solar_energy).
- [41] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.: *Solar engineering of thermal processes*. Publikováno v: Wiley Online Library, 2013, ISBN 9781118671603. Dostupné na: <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
- [42] ANSI/ASHRAE Standard 93-2003. *Methods of Testing to Determine Thermal Performance of Solar Collectors*, ASHRAE 93, 2003, ISSN: 1041-2336.

- [43] BROWNSON, J. R. S.: *Lesson 2 – Tools for Time and Space Relationship - 2.13 Sky Dome and Projections – Figure 2.14: We display the path of the Sun across two days for the Northern Hemisphere. One day in summer and one in winter, where the trail of the beam has been projected onto the sky dome using angular coordinates of solar azimuth ( $\gamma_s$ ) and solar altitude ( $\alpha_s$ ).* Publikováno v: EME 810: Solar Resource Assessment and Economics. Dostupné na: <https://www.e-education.psu.edu/eme810/node/534>.
- [44] Isotropic Bihemispherical Reflectance (White Sky Albedo). Dostupné na: [https://ramibenchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/MISCELLANEOUS/MEASUREMENTS/Isotropic\\_Bihemispherical\\_Reflectance\\_\(White\\_Sky\\_Albedo\)/Isotropic\\_Bihemispherical\\_Reflectance\\_\(White\\_Sky\\_Albedo\).php](https://ramibenchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/MISCELLANEOUS/MEASUREMENTS/Isotropic_Bihemispherical_Reflectance_(White_Sky_Albedo)/Isotropic_Bihemispherical_Reflectance_(White_Sky_Albedo).php).

## SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Zkratka Vyjadřuje

BSim	Building simulation
TRNSYS	Transient Systems Simulation
ČSN	Česká technická norma
ČSN EN	převzatá Evropská norma
TUBO	Technical University Brno (meteorologická stanice)

Značka	Jednotka	Veličina
$A$	$[m^2]$	plocha pláště zásobníku
$A_{c,i}$	$[m^2]$	průřezová plocha stratifikační vrstvy i
$A_{c,wall}$	$[m^2]$	průřezová plocha zásobníku
$A_{c,water}$	$[m^2]$	průřezová plocha kapaliny v zásobníku
$A_{kol}$	$[m^2]$	celková plocha kolektoru
$A_p$	$[m^2]$	celková plocha apertury kolektorů
$A_{s,i}$	$[m^2]$	plocha pláště stratifikační vrstvy i
$A_{W,i}$	$[m^2]$	ekvivalentní povrch zásobníku pro časový krok i
$A_{W,max}$	$[m^2]$	plocha pláště zásobníku
$A_{W,mn}$	$[m^2]$	ekvivalentní povrch zásobníku odpovídající střední hodnotě denního cyklu
$b_0$	$[-]$	lineární součinitel modifikátoru úhlu dopadu IAM
$b_1$	$[-]$	kvadratický součinitel modifikátoru úhlu dopadu IAM
$c$	$[J/(kg \cdot K)]$	měrná tepelná kapacita vody
$c_0 \sim c_i$	$[-]$	regulační funkce na straně vstupu
$C$	$[-]$	konstanta v Nusseltově čísle
$C_p$	$[J/(kg \cdot K)]$	tepelná kapacita kapaliny
$C_{pf}$	$[J/(kg \cdot K)]$	tepelná kapacita kapaliny proudící v kolektoru
$d_{iz}$	$[m]$	vnější průměr izolace
$d_o$	$[m]$	vnější průměr
$D_W$	$[m]$	vnější průměr zásobníku
$f$	$[\%]$	podíl vložené či vyrobené energie
$f_{par}$	$[-]$	kontrolní funkce ovlivňující jeho výkon a hmotnostní průtok
$F_R$	$[-]$	schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo

$F_{av}$	[-]	modifikovaná schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo při aplikování průměrné teploty kapaliny v kolektoru $T_{av}$ místo $T_i$
$F_o$	[-]	modifikovaná schopnost kolektoru přeměnit sluneční záření na teplo při aplikování teploty kapaliny na straně výstupu z kolektoru $T_o$ místo $T_i$
$h_1$	[kJ/kg]	měrná entalpie vody na konci ohřevu
$h_2$	[kJ/kg]	měrná entalpie vody na počátku ohřevu
$H_T$	[kWh/(m <sup>2</sup> ·měs)]	měsíční dávka solárního ozáření
$I$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita slunečního záření dopadajícího na horizontální rovinu
$I_{bT}$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita přímého slunečního záření dopadajícího na rovinu kolektoru
$I_d$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita difúzního slunečního záření dopadajícího na horizontální rovinu
$I_G$	[W/m <sup>2</sup> ]	globální sluneční záření dopadající na plochu kolektoru
$I_T$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita slunečního záření dopadajícího na rovinu kolektoru
$l_{ip}$	[m]	úsek přívodního potrubí v interiéru
$l_{ep}$	[m]	úsek přívodního potrubí v exteriéru
$l_{iv}$	[m]	úsek vratného potrubí v interiéru
$l_{ev}$	[m]	úsek vratného potrubí v exteriéru
$L_{mtd}$	[K]	střední logaritmická hodnota teplotního rozdílu
$L_W$	[m]	vnější výška zásobníku
$\dot{m}$	[kg/h]	hmotnostní průtok
$\dot{m}_{down}$	[kg/h]	celkový průtok kapaliny v zásobníku směrem dolů
$\dot{m}_i$	[kg/h]	hmotnostní průtok teplotnosné látky na vstupu
$\dot{m}_{max}$	[kg/h]	maximální hmotnostní průtok kapaliny
$\dot{m}_o$	[kg/h]	hmotnostní průtok teplotnosné látky na výstupu
$\dot{m}_{test}$	[kg/h]	hmotnostní průtok při testovacích okrajových podmínkách
$\dot{m}_{up}$	[kg/h]	celkový průtok kapaliny v zásobníku směrem nahoru
$\dot{m}_1$	[kg/h]	hmotnostní průtok teplotnosné látky první větve
$\dot{m}_2$	[kg/h]	hmotnostní průtok teplotnosné látky druhé větve
$M_i$	[kg/h]	hmotnostní průtok ve stratifikační vrstvě i
$n$	[-]	součinitel prostupu tepla
$n_{den}$	[-]	počet dnů v měsíci



$n_{Nu}$	[-]	exponent v Nusseltově čísle
$N_S$	[-]	počet identických kolektorů sériově zapojených
$N_u$	[-]	Nusseltovo číslo
$Nu_D$	[-]	Nusseltovo číslo pro obtékání trubky na vnější straně
$p$	[-]	srážka z tepelných zisků vlivem tepelných ztrát
$P$	[W]	výkon zdroje
$P_{max}$	[W]	maximální příkon
$P_p$	[W]	příkon zdroje
$P_{W,ls}$	[W]	příkon pro udržení teploty v zásobníku
$Q$	[kWh]	množství tepla potřebného k ohřevu
$\dot{Q}_{aux}$	[W]	množství tepla dodaného vnitřním zdrojem tepla
$Q_{el}$	[kWh/rok]	množství tepla dodaného elektrickým topným tělesem
$Q_{HX}$	[kWh/rok]	množství tepla dodaného solárním výměníkem
$Q_{loss}$	[kWh/rok]	tepelné ztráty zásobníku
$Q_{ss,u}$	[kWh/rok]	využitelné tepelné zisky solární soustavy
$Q_{tv,měs}$	[kWh/rok]	měsíční potřeba tepla
$Q_{tv,rok}$	[kWh/rok]	roční potřeba tepla
$Q_u$	[W]	tepelný výkon kolektoru
$Q_{W,ls}$	[MJ/den]	tepelné ztráty zásobníku
$Q_{W,ls,n}$	[MJ/den]	normová hodnota pro ztráty tepla
$Q_{W,out}$	[MJ/den]	dodávka tepla z plynového ohřívače
$Q_{W,m}$	[MJ]	ztráta tepla zásobníku tepla v pohotovostním stavu při průměrném rozdílu teplot 45 °C v průběhu zkoušky
$Q_{zk}$	[W]	tepelná ztráta zásobníku
$Q_{2p}$	[kWh/den]	celkové teplo odebrané z ohřívače
$Q_{2t}$	[kWh/den]	teplo odebrané uživatelem
$Q_{2z}$	[kWh/den]	teplo ztracené při ohřevu a distribuci
$R_a$	[-]	Rayleightovo číslo
$s_p$	[m]	tloušťka stěny potrubí
$S_A$	[m <sup>2</sup> ]	plocha solárních kolektorů
$T_{av}$	[°C]	průměrná teplota kapaliny v kolektoru
$T_{env}$	[°C]	teplota okolního prostředí
$T_f$	[°C]	průměrná teplota spalinového vzduchu během vypnutého plynového ohřívače

$T_H$	[°C]	horní hranice teploty na straně vstupu
$T_i$	[°C]	teplota kapaliny v i-té vrstvě
$T_{in}$	[°C]	teplota kapaliny na straně vstupu
$T_L$	[°C]	dolní hranice teploty na straně vstupu
$T_{out}$	[°C]	teplota kapaliny na straně výstupu
$T_z$	[K]	teplota vody v zásobníku
$T_1$	[°C]	teplota teponosné látky první větve
$T_2$	[°C]	teplota teponosné látky druhé větve
$U$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	součinitel prostupu tepla zásobníku
$U_i$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	součinitel prostupu tepla v místě zesílení / zeslabení
$U_L$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	koeficient celkové tepelné ztráty kolektoru
$U_{LT}$	[W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )]	koeficient tepelné ztráty kolektoru závislý na teplotě T
$U'_L$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	modifikovaný koeficient tepelné ztráty kolektoru
$U_p$	[W/(m·K)]	součinitel prostupu tepla potrubí
$V_z$	[m <sup>3</sup> ]	objem zásobníku
$V_{tv,den}$	[m <sup>3</sup> /den]	předpokládaná denní potřeba teplé vody
$V_{2p}$	[m <sup>3</sup> /den]	celková denní potřeba teplé vody
$z$	[-]	přirážka pro zahrnutí tepelných ztrát
$\alpha$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	součinitel přestupu tepla na vnější straně výměníku
$\alpha_e$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	součinitel přestupu tepla na vnější straně povrchu
$\alpha_i$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně povrchu
$\alpha_k$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	součinitel přestupu tepla konvekcí na povrchu izolace
$\alpha_r$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	součinitel přestupu tepla radiací na povrchu izolace
$a_1$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	lineární součinitel tepelné ztráty
$a_2$	[W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )]	kvadratický součinitel tepelné ztráty
$\gamma$	[-]	regulační funkce
$\gamma_E$	[-]	schopnost zařízení předat kapalině potřebnou energii
$\gamma_{htr}$	[W/K]	tepelný tok přes plášť plynového ohříváče
$\gamma_i$	[-]	další volitelné kontrolní funkce ohříváče
$\gamma_o$	[-]	regulační funkce na straně výstupu
$\gamma_s$	[°]	sluneční azimut
$\Gamma$	[-]	regulační funkce
$\Delta Q_{max}$	[kWh]	maximální rozdíl mezi odebraným a dodaným teplem

$\Delta k$	[W/m·K]	přirážka k tepelné vodivosti kapaliny při destratifikaci
$\Delta T_H$	[°C]	horní hranice odchylky od požadované teploty
$\Delta T_L$	[°C]	dolní hranice odchylky od požadované teploty
$\Delta U_i$	[W/m <sup>2</sup> ·K]	přirážka součinitele prostupu tepla pro zesílení /zeslabení
$\Delta x$	[m]	osová vzdálenost mezi dvěma stratifikačními vrstvami
$\Delta \theta_{W,avg}$	[°C]	průměrný rozdíl teplot použitý pro stanovení výkonu pro udržení teploty vody
$\eta$	[-]	účinnost zdroje
$\eta_k$	[-]	střední měsíční účinnost solárního kolektoru
$\eta_0$	[-]	optická účinnost
$\theta_{a,avg}$	[°C]	průměrná teplota okolního prostředí
$\theta_{W,avg}$	[°C]	průměrná teplota vody v zásobníku tepla
$\theta_1$	[°C]	teplota na vstupu
$\theta_2$	[°C]	teplota na výstupu
$\theta_{1,p}$	[°C]	teplota kapaliny v daném úseku potrubí
$\theta_{2,p}$	[°C]	teplota okolního vzduchu v daném úseku potrubí
$\Theta$	[°]	úhel dopadu přímého slunečního záření
$\lambda$	[W/(m·K)]	tepelná vodivost kapaliny v zásobníku
$\lambda_f$	[W/(m·K)]	měrná tepelná vodivost kapaliny
$\lambda_{iz}$	[W/(m·K)]	měrná tepelná vodivost materiálu potrubí
$\lambda_p$	[W/(m·K)]	měrná tepelná vodivost materiálu potrubí
$\lambda_{wall}$	[W/(m·K)]	tepelná vodivost stěny zásobníku
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	měrná objemová hmotnost vody
$\rho_g$	[-]	součinitel propustnosti a pohltivosti slunečního záření kolektoru
$\tau$	[hod]	doba ohřevu teplé vody
$\tau_i$	[hod]	doba odběru teplé vody
$\omega_i$	[°C]	vlhkost teplotonosné látky na vstupu
$\omega_o$	[°C]	vlhkost teplotonosné látky na výstupu
$\omega_1$	[°C]	vlhkost teplotonosné látky první větve
$\omega_2$	[°C]	vlhkost teplotonosné látky druhé větve
$(\tau\alpha)$	[-]	schopnost zeminy odrazit sluneční záření
$(\tau\alpha)_b$	[-]	součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru pro přímé sluneční záření

$(\tau\alpha)_d$	[-]	součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru pro difúzní sluneční záření
$(\tau\alpha)_g$	[-]	součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru pro sluneční záření odražené od zeminy
$(\tau\alpha)_n$	[-]	součinitel propustnosti a pohltivosti kolektoru při obecném dopadu slunečního záření
$(UA)_{f,i}$	[W/K]	tepelný tok přes plášť plynového ohříváče
$(UA)_{hx}$	[W/K]	tepelný tok přes konstrukci tepelného výměníku

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1-1: Globální solární záření dopadající na území České republiky [8] .....	12
Obr. 1.3-1: Příklad odběrového diagramu .....	18
Obr. 1.3-2: Schéma solární sestavy s vyznačením jednotlivých úseků potrubí [35] .....	21
Obr. 3.1-1: Měřená solární sestava [36] .....	23
Obr. 3.1-2: Schéma měřené solární sestavy [36] .....	24
Obr. 3.1-3: Ukázka záznamu naměřených dat v grafické nadstavbě DESIGO-INSIGHT .....	24
Obr. 3.1-4: Schéma solární soustavy v programu DESIGO .....	25
Obr. 3.1-5: Validace modelu – intenzita dopadajícího slunečního záření .....	27
Obr. 3.1-6: Histogram a krabicový graf pro intenzitu solárního záření.....	27
Obr. 3.1-7: Validace modelu – venkovní teplota .....	28
Obr. 3.1-8: Histogram a krabicový graf pro venkovní teplotu .....	28
Obr. 3.1-9: Validace modelu – teplota kapaliny na výstupu z kolektoru .....	29
Obr. 3.1-10: Histogram a krabicový graf pro teplotu kapaliny na výstupu z kolektoru .....	29
Obr. 3.2-1: Histogram a krabicový graf pro solární podíl.....	32
Obr. 3.3-1: Schéma modelu solární soustavy .....	34
Obr. 3.3-2: Grafické znázornění energetické balance i-té vrstvy zásobníku [39] .....	37
Obr. 3.3-3: Příčný a podélný úhel dopadu slunečního záření .....	42
Obr. 3.3-4: Dopad slunečního záření při zakřivení oblohy [43] .....	43
Obr. 3.3-5: Model izotropní bihemisférické odrazivosti difúzního záření [44] .....	43
Obr. 3.3-6: T-kus bez regulace [39].....	45
Obr. 3.3-7: T-kus rozdělovací s regulací [39].....	46
Obr. 3.3-8: T-kus směšovací s regulací [39].....	47
Obr. 3.3-9: T-kus s funkcí trojcestné směšovací armatury [39] .....	48
Obr. 3.3-10: Průměrná denní potřeba teplé vody .....	50

Obr. 3.3-11: Navržený denní odběr teplé vody.....	50
Obr. 4.3-1: Roční podíl využití solárních zisků – odběr 200 l/den.....	54
Obr. 4.3-2: Roční podíl využití solárních zisků – odběr 300 l/den.....	54
Obr. 4.4-1: Poměr ročních solárních zisků vůči tepelným ztrátám zásobníku – odběr 200 l/den .....	56
Obr. 4.4-2: Poměr ročních solárních zisků vůči tepelným ztrátám zásobníku – odběr 300 l/den .....	56
Obr. 4.5-1: Roční tepelné ztráty zásobníku vztažené na 1 l objemu ohřívání kapaliny – odběr 200 l/den .....	58
Obr. 4.5-2: Roční tepelné ztráty zásobníku vztažené na 1 l objemu ohřívání kapaliny – odběr 300 l/den .....	58
Obr. 4.6-1: Roční tepelné ztráty zásobníku vztažené na 1 l ohřívání kapaliny a 1 m <sup>2</sup> apertury solárního kolektoru – odběr 200 l/den .....	60
Obr. 4.6-2: Roční tepelné ztráty zásobníku vztažené na 1 l ohřívání kapaliny a 1 m <sup>2</sup> apertury solárního kolektoru – odběr 300 l/den .....	60
Obr. 4.7-1: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – odběr 200 l/den .....	62
Obr. 4.7-2: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – odběr 300 l/den .....	62

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 150 l .....	84
Graf 2: Tepelná bilance zásobníku tepla – 150 l .....	84
Graf 3: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 150 l .....	85
Graf 4: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 150 l .....	85
Graf 5: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 200 l .....	87
Graf 6: Tepelná bilance zásobníku tepla – 200 l .....	87
Graf 7: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 200 l .....	88
Graf 8: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 200 l .....	88
Graf 9: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 250 l .....	90
Graf 10: Tepelná bilance zásobníku tepla – 250 l .....	90
Graf 11: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 250 l .....	91
Graf 12: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 250 l .....	91
Graf 13: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 300 l .....	93
Graf 14: Tepelná bilance zásobníku tepla – 300 l .....	93
Graf 15: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 300 l .....	94
Graf 16: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 300 l .....	94
Graf 17: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 400 l .....	96
Graf 18: Tepelná bilance zásobníku tepla – 400 l .....	96
Graf 19: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 400 l .....	97
Graf 20: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 400 l .....	97
Graf 21: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 500 l .....	99
Graf 22: Tepelná bilance zásobníku tepla – 500 l .....	99
Graf 23: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 500 l .....	100
Graf 24: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 500 l .....	100

Graf 25: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 600 l .....	102
Graf 26: Tepelná bilance zásobníku tepla – 600 l .....	102
Graf 27: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 600 l .....	103
Graf 28: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 600 l .....	103
Graf 29 Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 750 l .....	105
Graf 30: Tepelná bilance zásobníku tepla – 750 l .....	105
Graf 31: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 750 l .....	106
Graf 32: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 750 l .....	106
Graf 33: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 800 l .....	108
Graf 34: Tepelná bilance zásobníku tepla – 800 l .....	108
Graf 35: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 800 l .....	109
Graf 36: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 800 l .....	109
Graf 37: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 1000 l .....	111
Graf 38: Tepelná bilance zásobníku tepla – 1000 l .....	111
Graf 39: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 1000 l .....	112
Graf 40: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 1000 l .....	112



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.3-1: Tepelná ztráta potrubí pro jednotlivé délky úseků v numerickém modelu .	21
Tab. 3.2-1: Předpokládaný solární podíl získaný výpočtem v procentech .....	31
Tab. 3.2-2: Předpokládaný solární podíl získaný simulací v procentech .....	32
Tab. 3.3-1: Parametry vybraných solárních zásobníků .....	49
Tab. 3.3-2: Parametry použitých solárních termických kolektorů.....	49
Tab. 4.1-1: Varianty použité v provedených simulacích .....	51
Tab. 4.2-1: Odpovídající objem solárního zásobníku v litrech v závislosti na solárním pokrytí .....	52
Tab. 4.7-1: Množství kapaliny v zásobníku ohřáté 1 m <sup>2</sup> kolektorové plochy při dosažení teplot 90 °C a 95 °C .....	61

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Zásobník 150 l .....	83
Příloha 2: Zásobník 200 l .....	86
Příloha 3: Zásobník 250 l .....	89
Příloha 4: Zásobník 300 l .....	92
Příloha 5: Zásobník 400 l .....	95
Příloha 6: Zásobník 500 l .....	98
Příloha 7: Zásobník 600 l .....	101
Příloha 8: Zásobník 750 l .....	104
Příloha 9: Zásobník 800 l .....	107
Příloha 10: Zásobník 1000 l .....	110

## Příloha 1: Zásobník 150 l

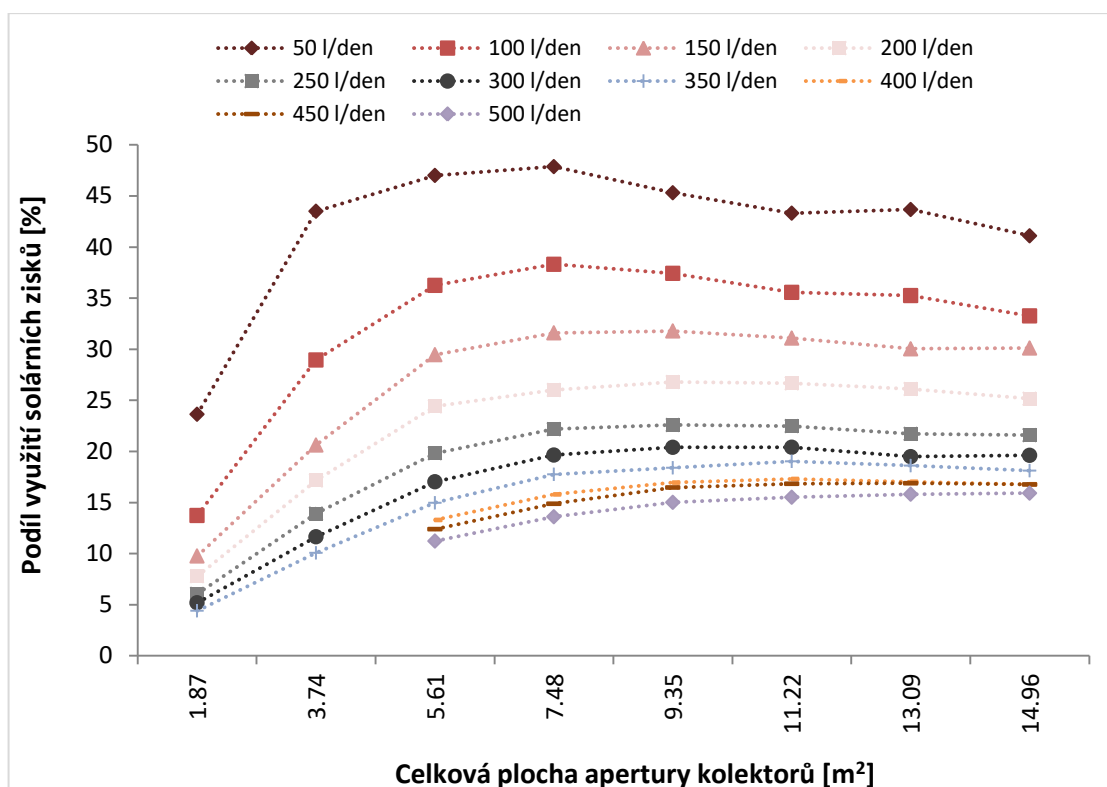
	150 l	
<b>Objem zásobníku</b>	142	l
<b>Výška zásobníku</b>	1.415	m
<b>Průměr zásobníku</b>	0.460	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.130	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.265	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.682	W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	0.686	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.068	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0216	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0269	m
<b>Plocha výměníku</b>	0.890	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	10.531	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.548	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.168	m

Graf 1: Roční podíl využití solárních zisků – 150 l

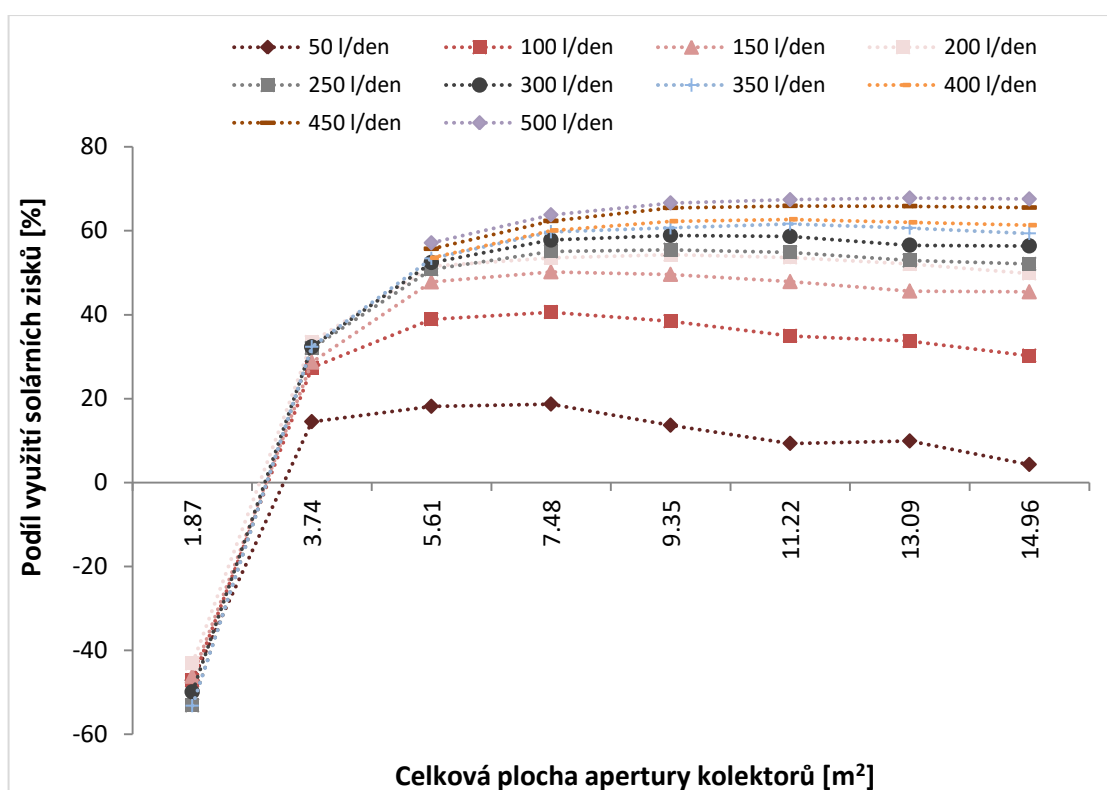
Graf 2: Tepelná bilance zásobníku tepla – 150 l

Graf 3: Roční tepelné ztráty zásobníku vztažené na 1 l objemu ohřívané kapaliny – 150 l

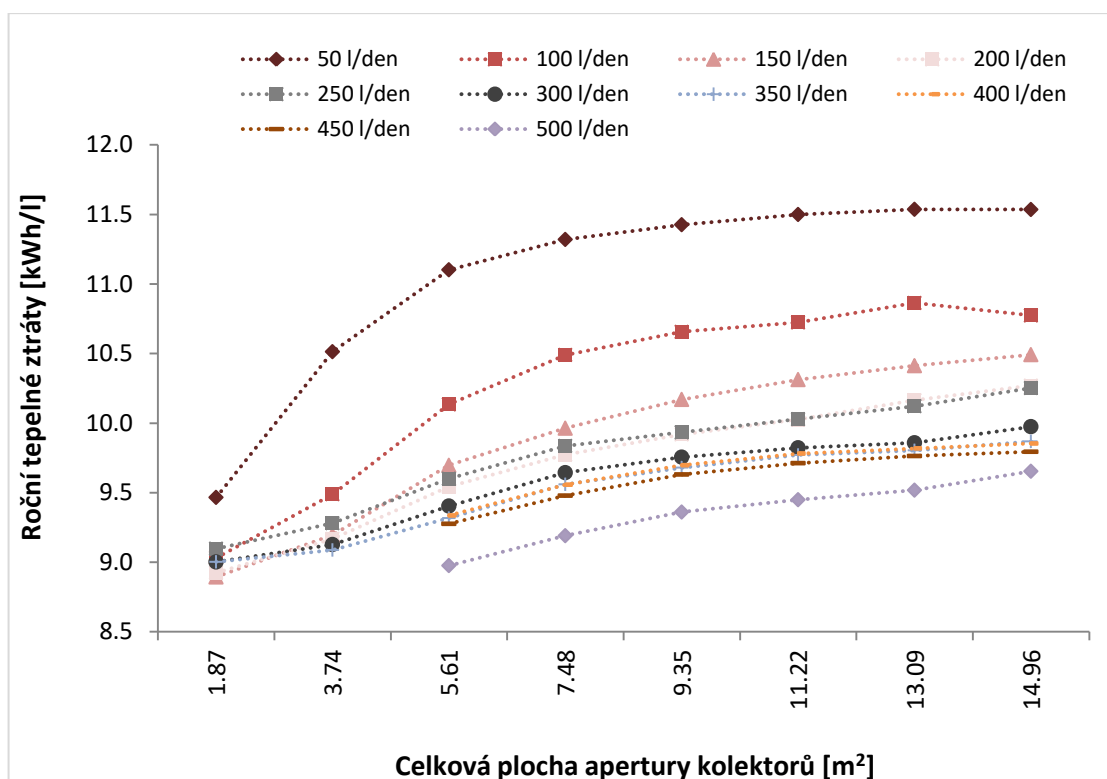
Graf 4: Nejvyšší dosažená teplota ohřívané kapaliny v solárním zásobníku – 150 l



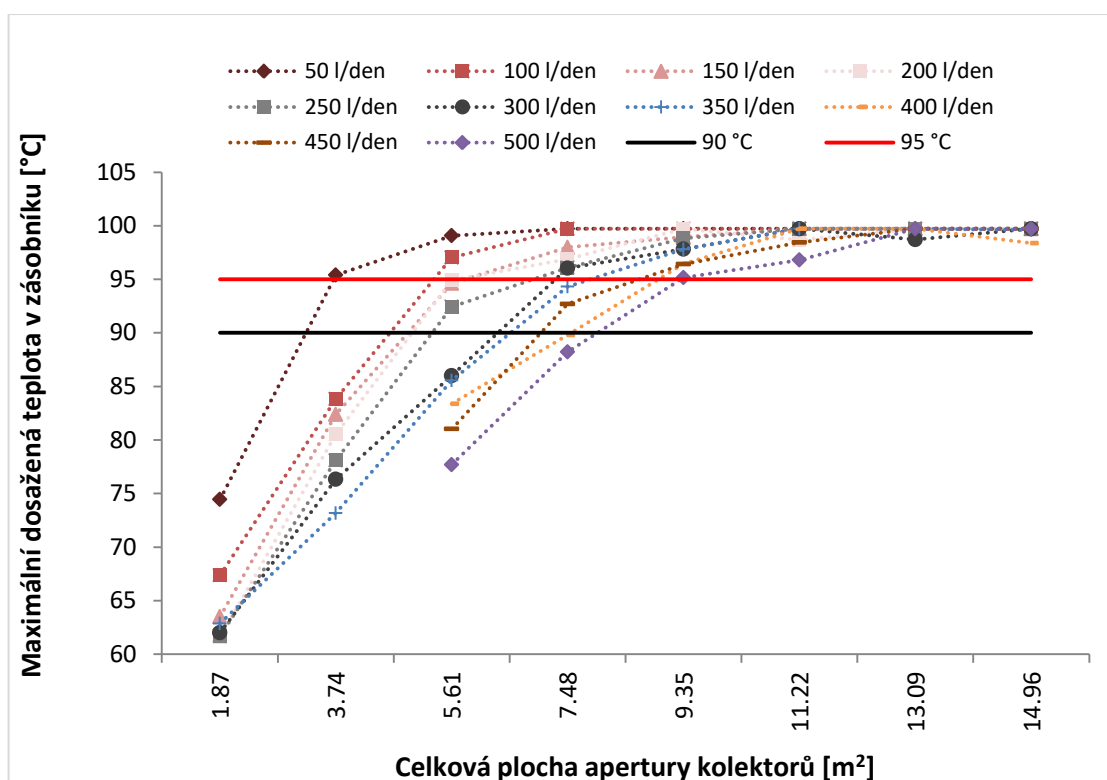
Graf 1: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 150 l



Graf 2: Tepelná bilance zásobníku tepla – 150 l



Graf 3: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 150 l



Graf 4: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 150 l

## Příloha 2: Zásobník 200 l

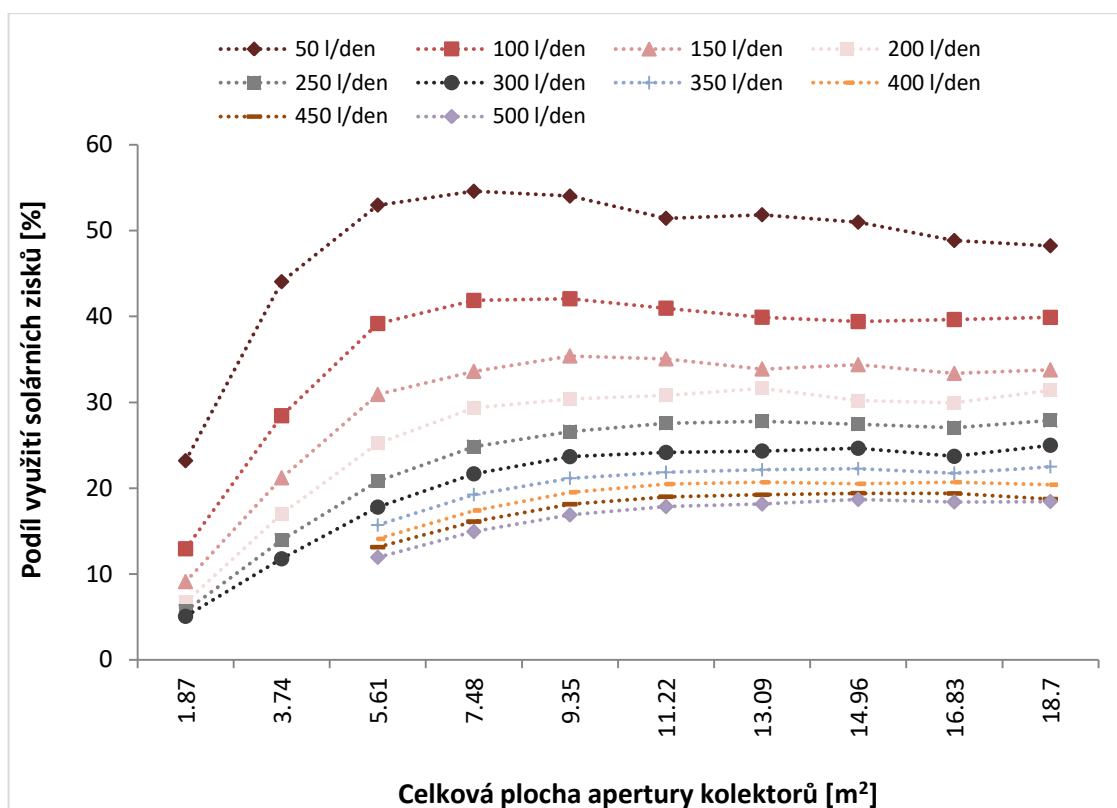
	200 l	
<b>Objem zásobníku</b>	182	l
<b>Výška zásobníku</b>	1.326	m
<b>Průměr zásobníku</b>	0.650	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.130	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.176	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg·K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.494	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m·K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	0.686	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.068	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0216	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0269	m
<b>Plocha výměníku</b>	1.000	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	11.833	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m·K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.548	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.168	m

Graf 5: Roční podíl využití solárních zisků – 200 l

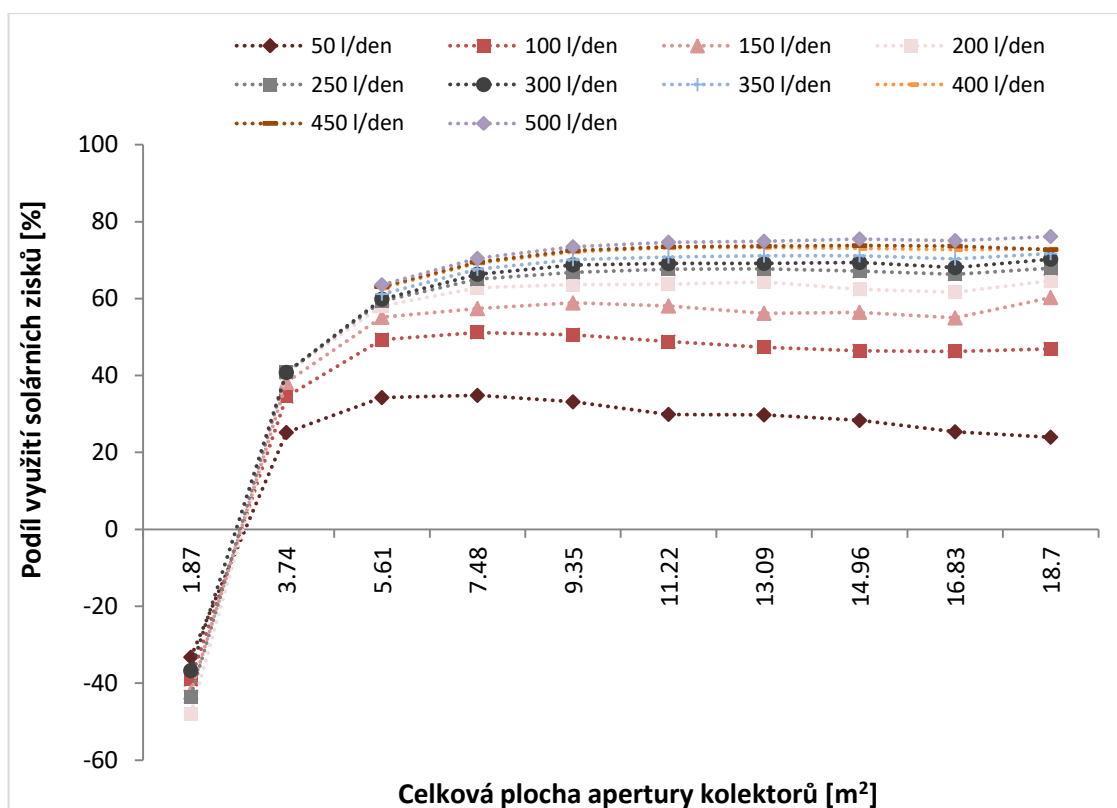
Graf 6: Tepelná bilance zásobníku tepla – 200 l

Graf 7: Tepelná ztráta zásobníku vztažená na 1 l objemu ohřívání kapaliny – 200 l

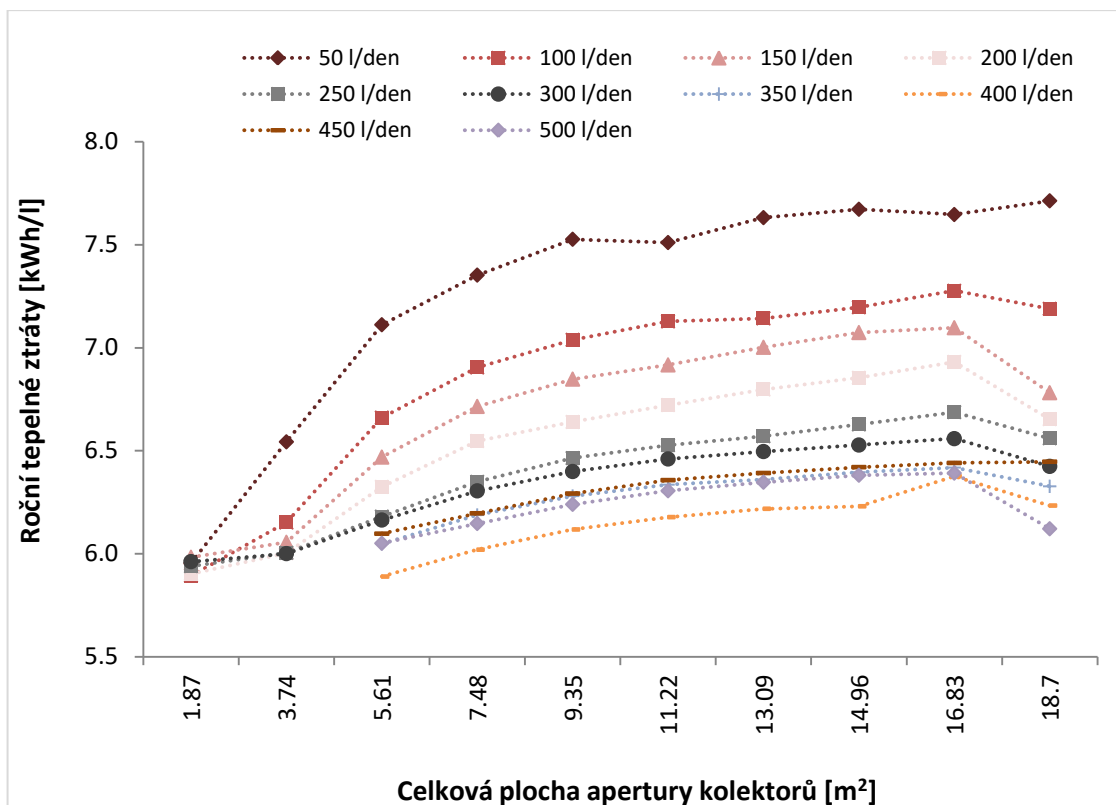
Graf 8: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 200 l



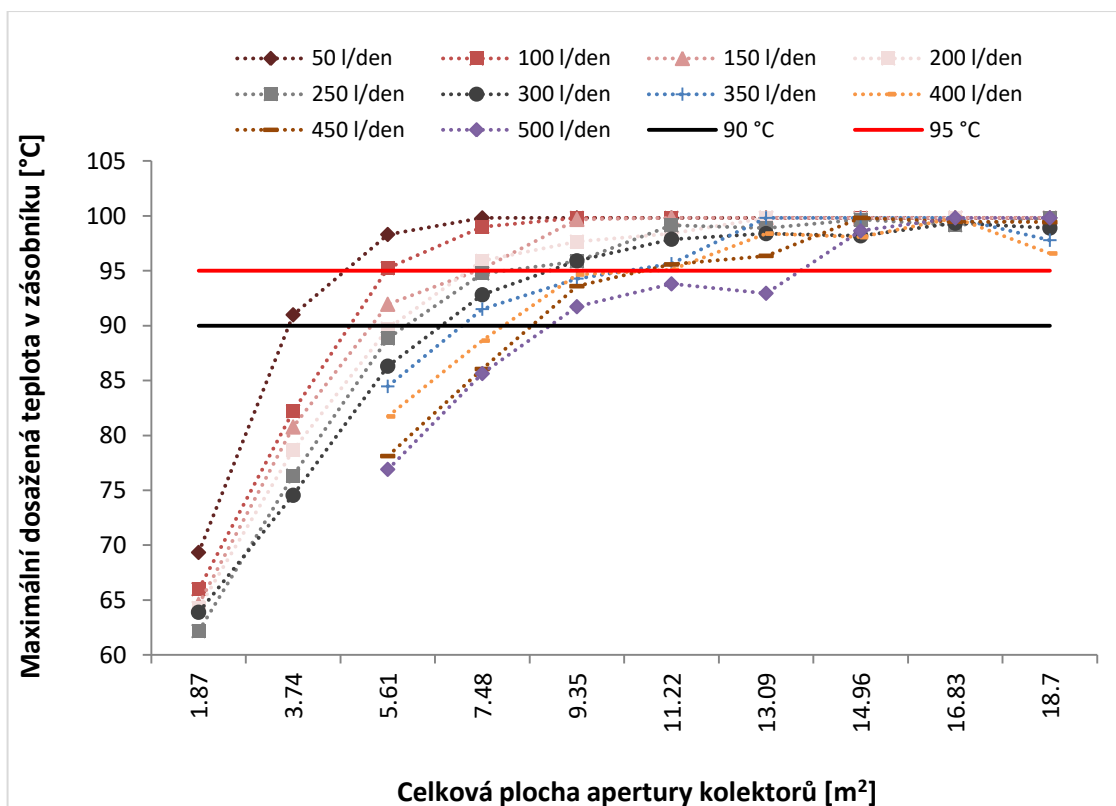
Graf 5: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 200 l



Graf 6: Tepelná bilance zásobníku tepla – 200 l



Graf 7: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 200 l



Graf 8: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 200 l



### Příloha 3: Zásobník 250 l

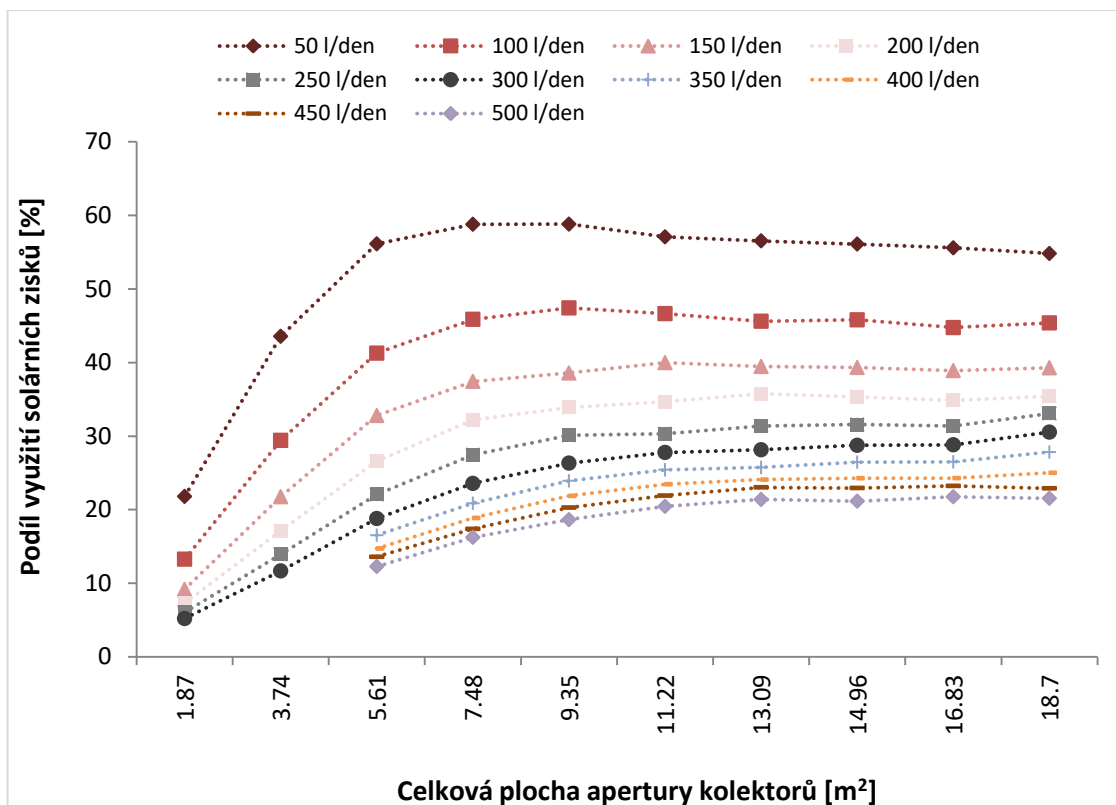
	250 l	
<b>Objem zásobníku</b>	242	l
<b>Výška zásobníku</b>	1.557	m
<b>Průměr zásobníku</b>	0.600	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.130	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.407	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg·K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.489	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m·K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	0.855	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.110	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0216	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0269	m
<b>Plocha výměníku</b>	1.450	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	17.158	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m·K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.645	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.195	m

Graf 9: Roční podíl využití solárních zisků – 250 l

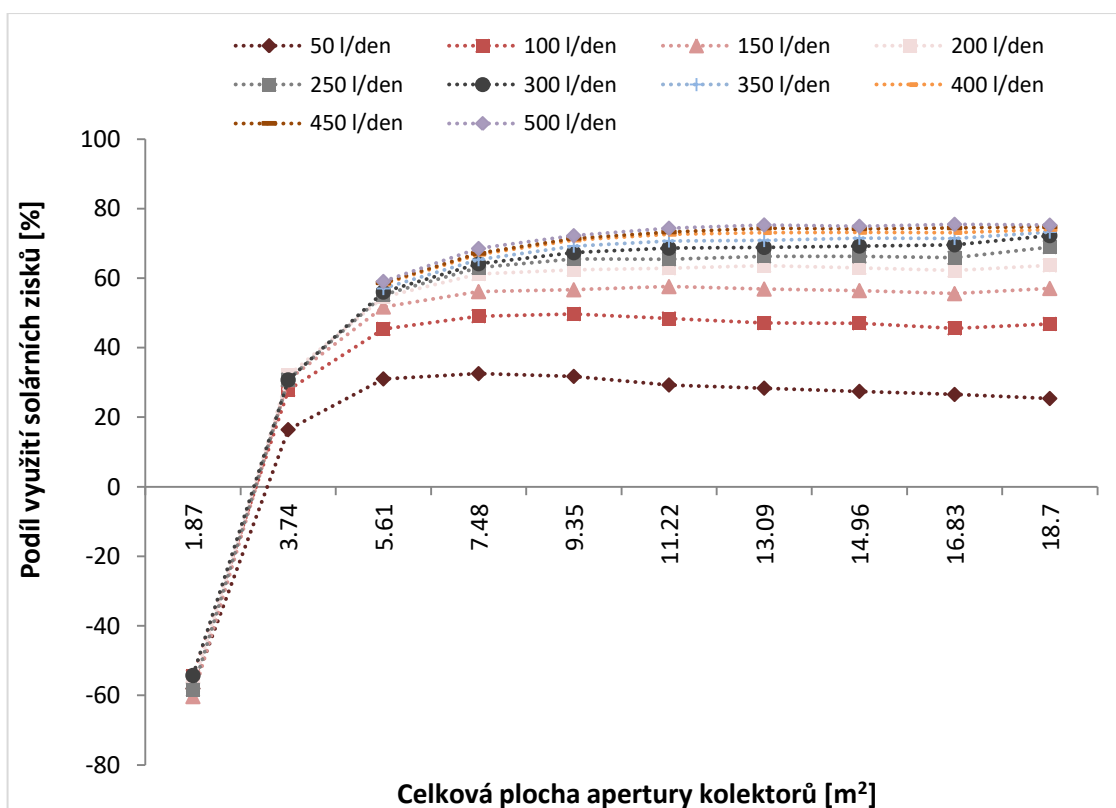
Graf 10: Tepelná bilance zásobníku tepla – 250 l

Graf 11: Tepelná ztráta zásobníku vztažená na 1 l objemu ohřívání kapaliny – 250 l

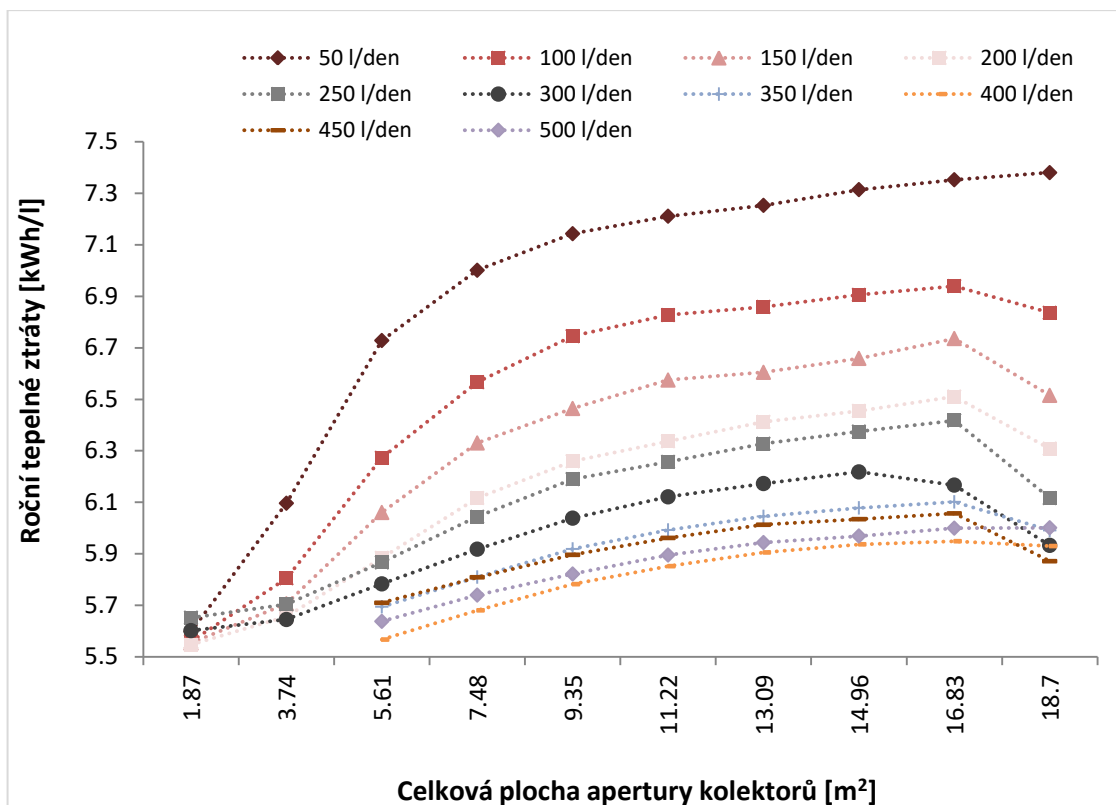
Graf 12: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 250 l



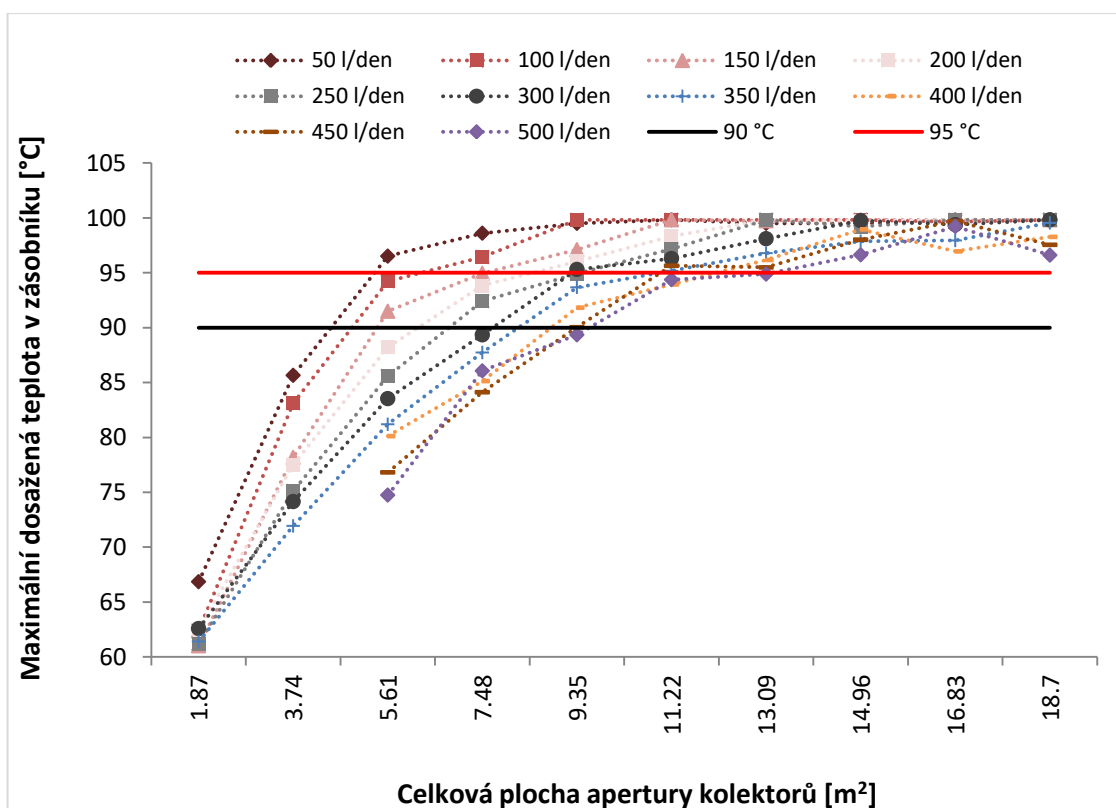
Graf 9: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 250 l



Graf 10: Tepelná bilance zásobníku tepla – 250 l



Graf 11: Tepelná ztráta vztažená na 1 liter objemu solárního zásobníku – 250 l



Graf 12: Nejvyšší dosažená teplota ohříváné kapaliny v solárním zásobníku – 250 l

## Příloha 4: Zásobník 300 l

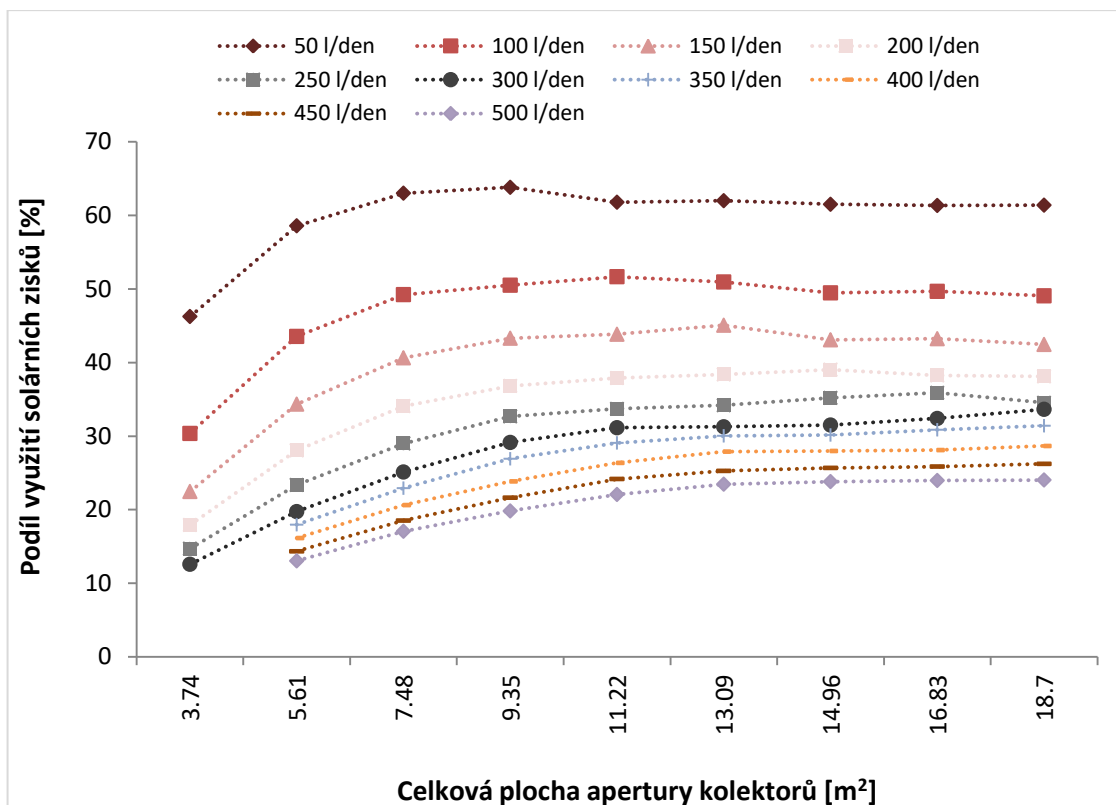
	<b>300 l</b>	
<b>Objem zásobníku</b>	280	l
<b>Výška zásobníku</b>	1.380	m
<b>Průměr zásobníku</b>	0.750	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.130	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.230	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg·K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.425	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m·K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	0.855	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.110	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0216	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0269	m
<b>Plocha výměníku</b>	1.500	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	17.750	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m·K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.645	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.195	m

Graf 13: Roční podíl využití solárních zisků – 300 l

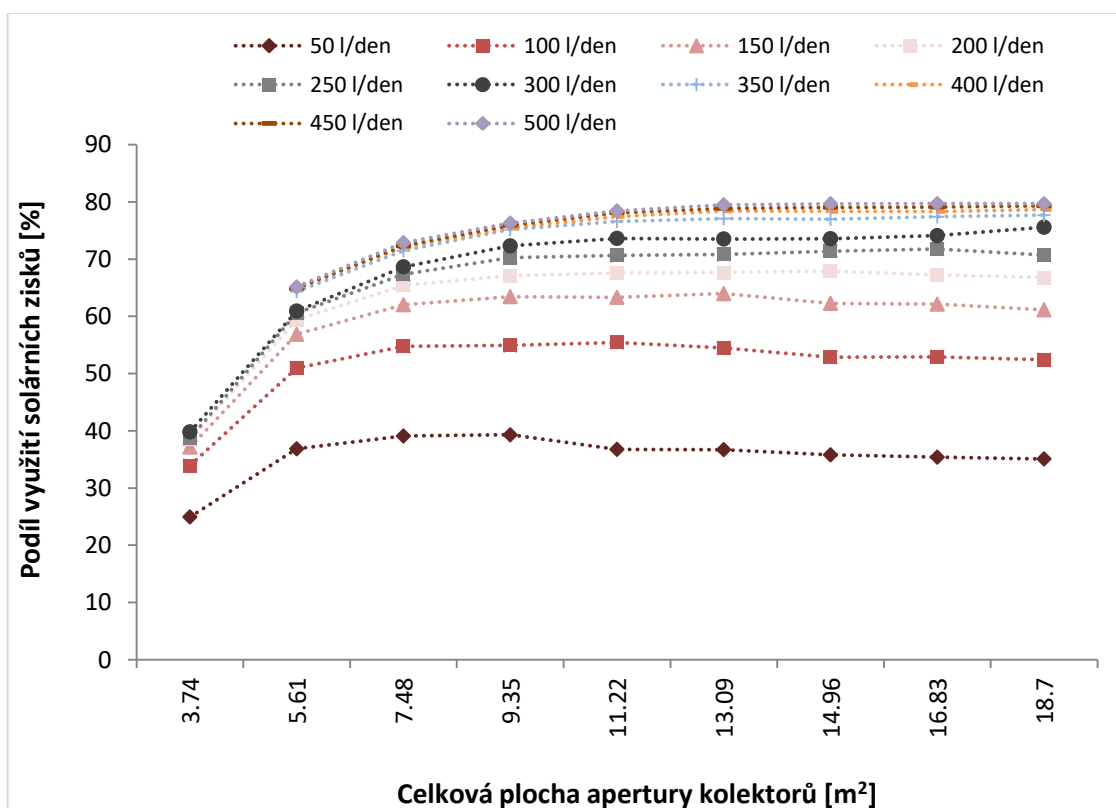
Graf 14: Tepelná bilance zásobníku tepla – 300 l

Graf 15: Tepelná ztráta zásobníku vztažená na 1 l objemu ohřívané kapaliny – 300 l

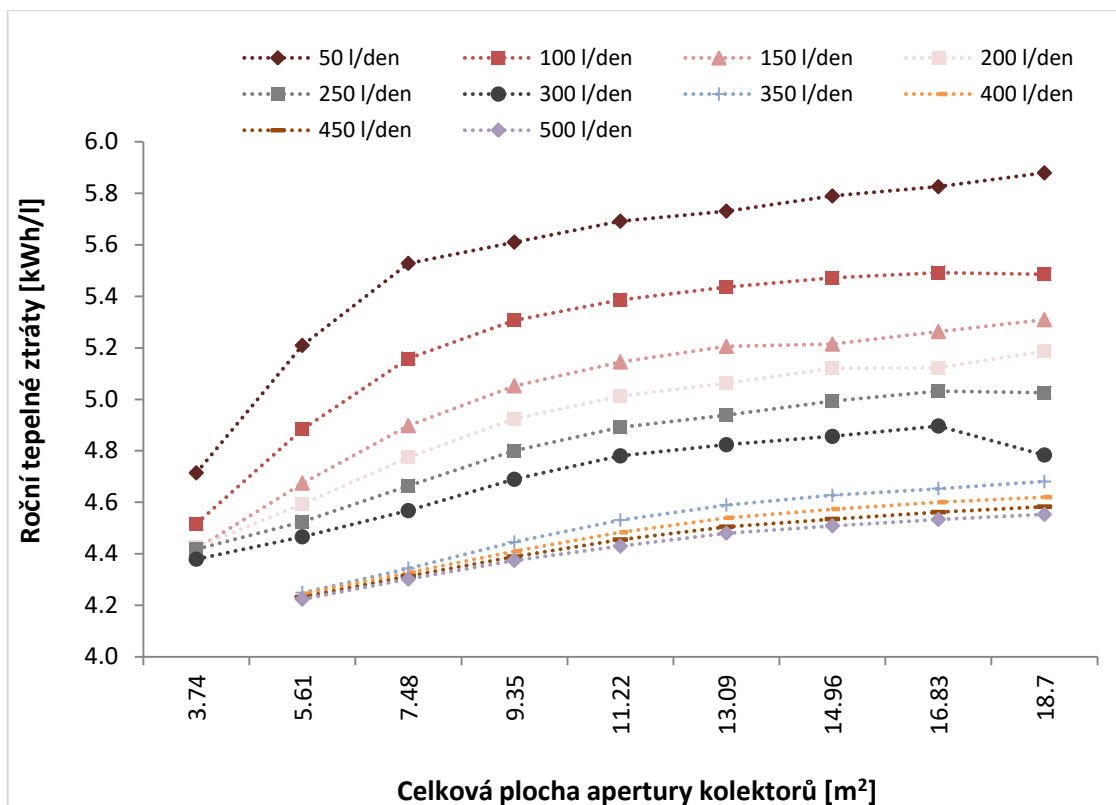
Graf 16: Nejvyšší dosažená teplota ohřívané kapaliny v solárním zásobníku – 300 l



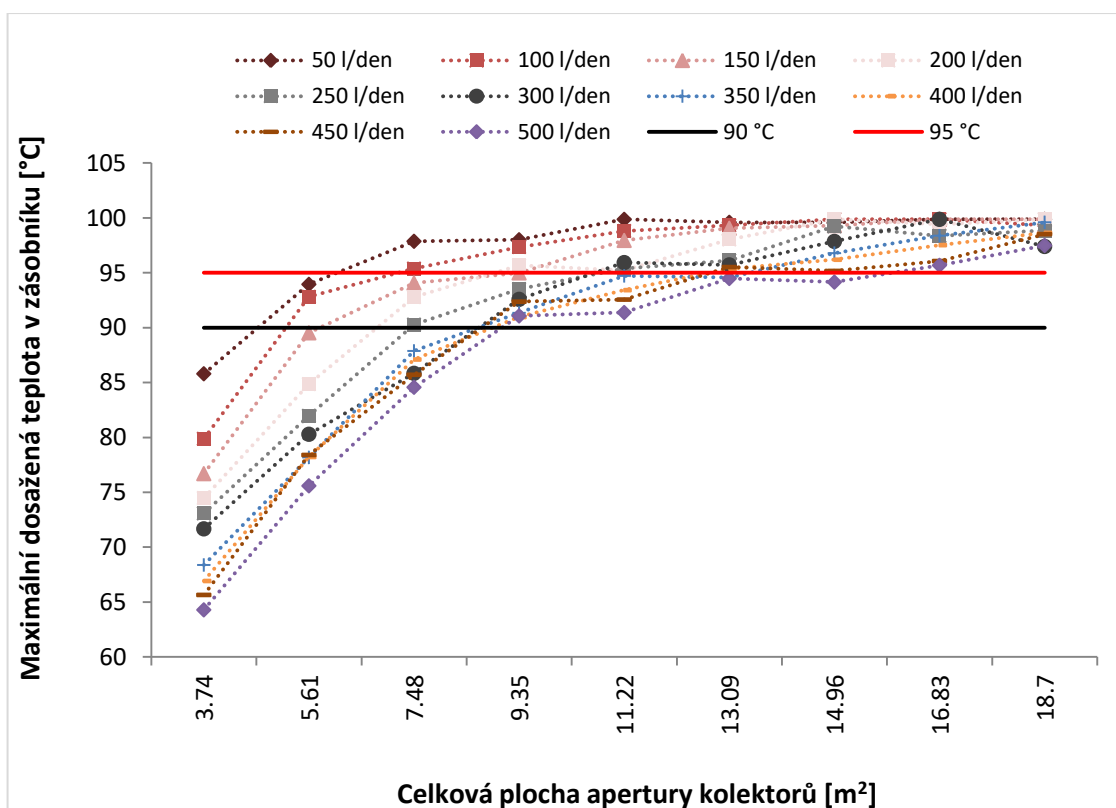
Graf 13: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 300 l



Graf 14: Tepelná bilance zásobníku tepla – 300 l



Graf 15: Tepelná ztráta vztažená na 1 liter objemu solárního zásobníku – 300 l



Graf 16: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 300 l

## Příloha 5: Zásobník 400 l

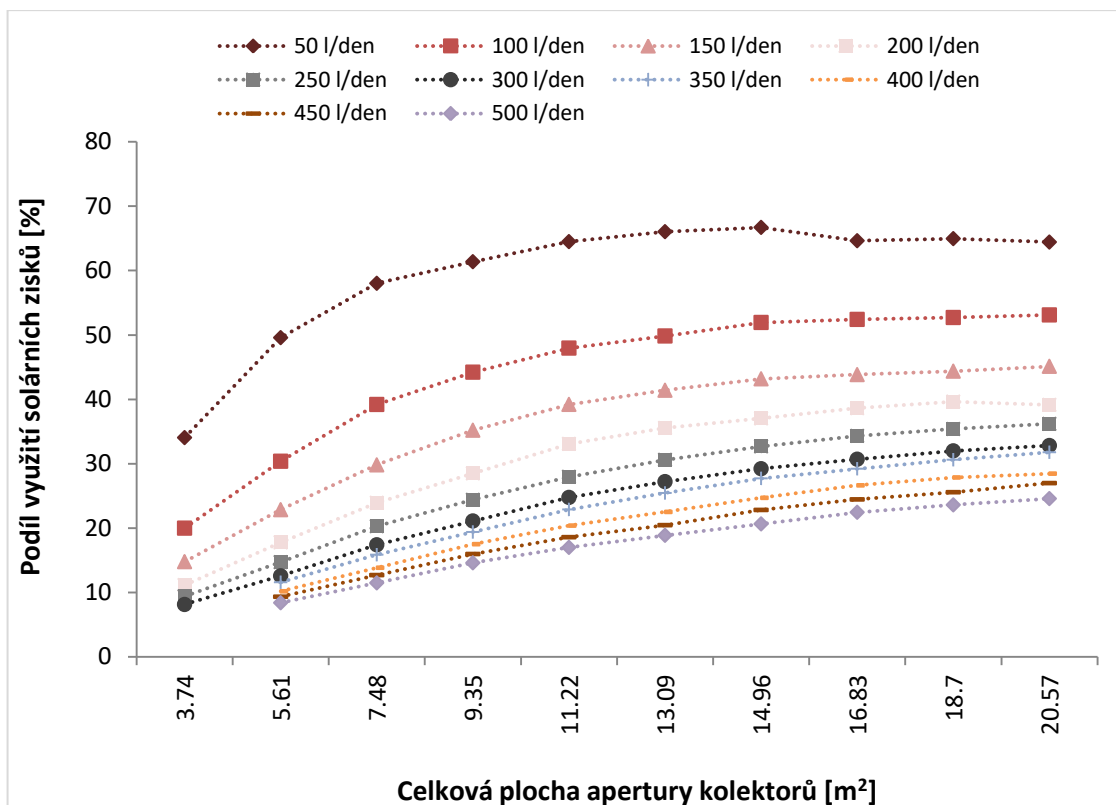
	400 l	
<b>Objem zásobníku</b>	373	l
<b>Výška zásobníku</b>	1.580	m
<b>Průměr zásobníku</b>	0.700	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.160	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.430	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg·K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.436	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m·K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	0.855	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.110	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0272	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0337	m
<b>Plocha výměníku</b>	1.800	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	17.002	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m·K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.645	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.195	m

Graf 17: Roční podíl využití solárních zisků – 400 l

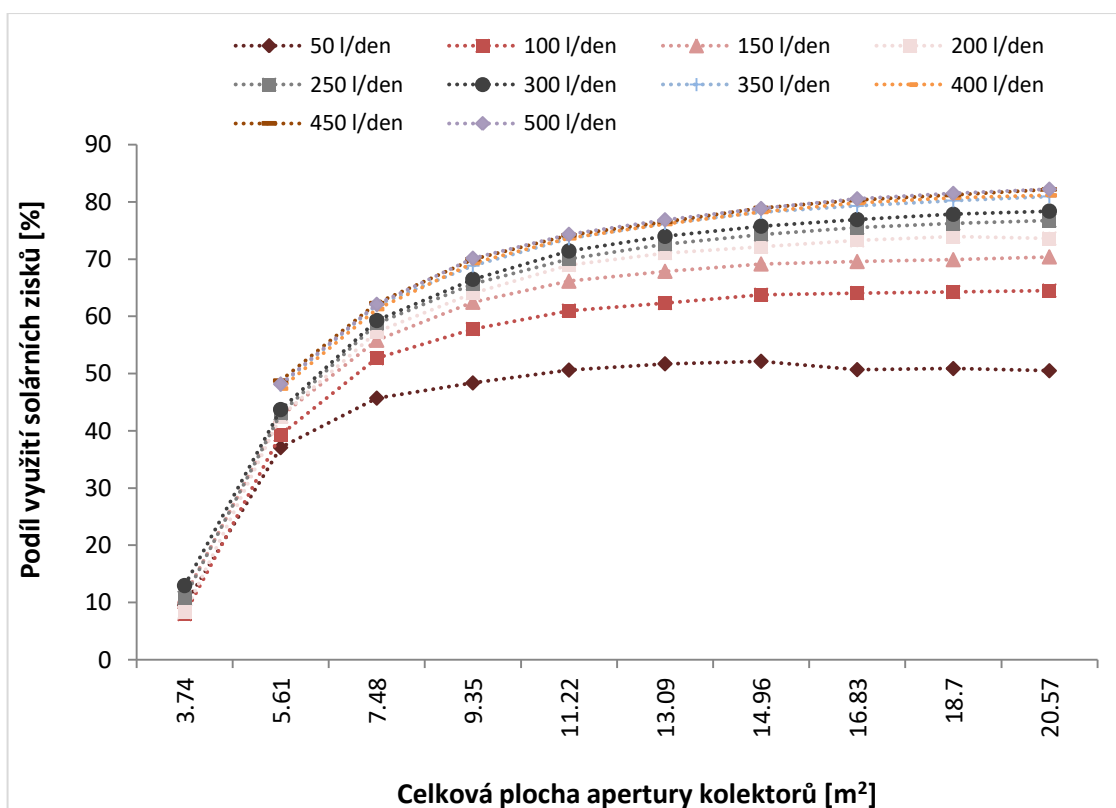
Graf 18: Tepelná bilance zásobníku tepla – 400 l

Graf 19: Tepelná ztráta zásobníku vztažená na 1 l objemu ohřívání kapaliny – 400 l

Graf 20: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 400 l

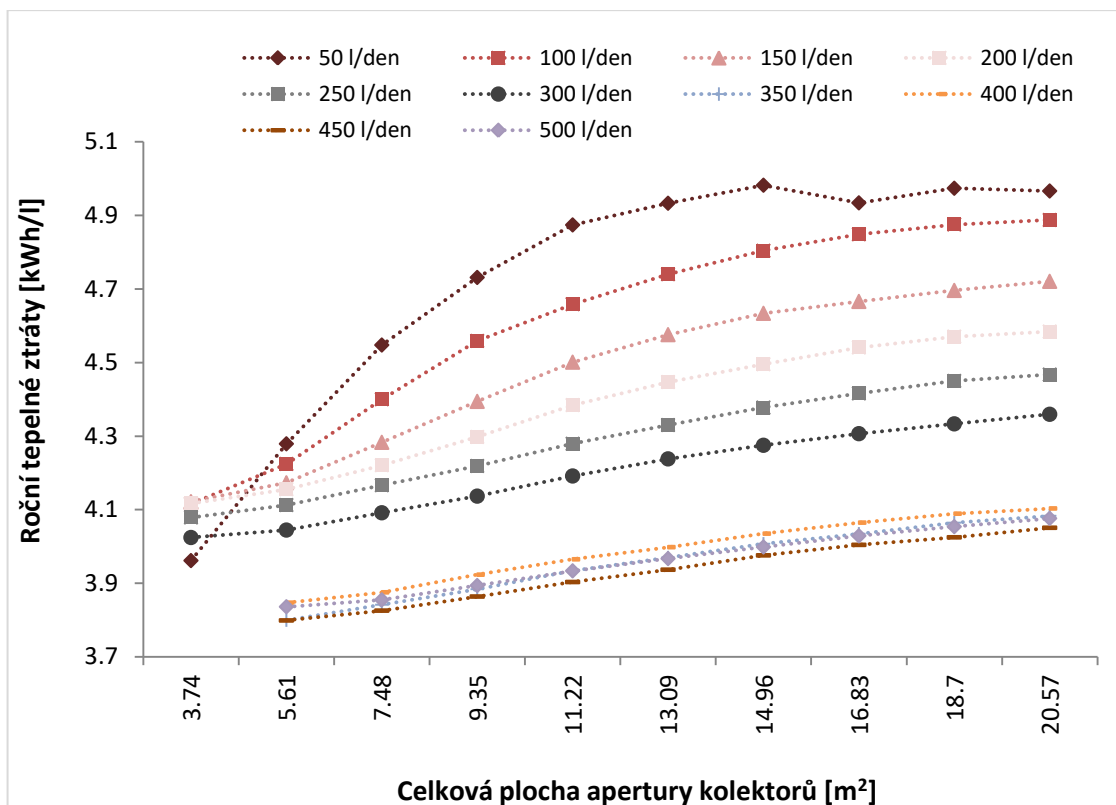


Graf 17: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 400 l

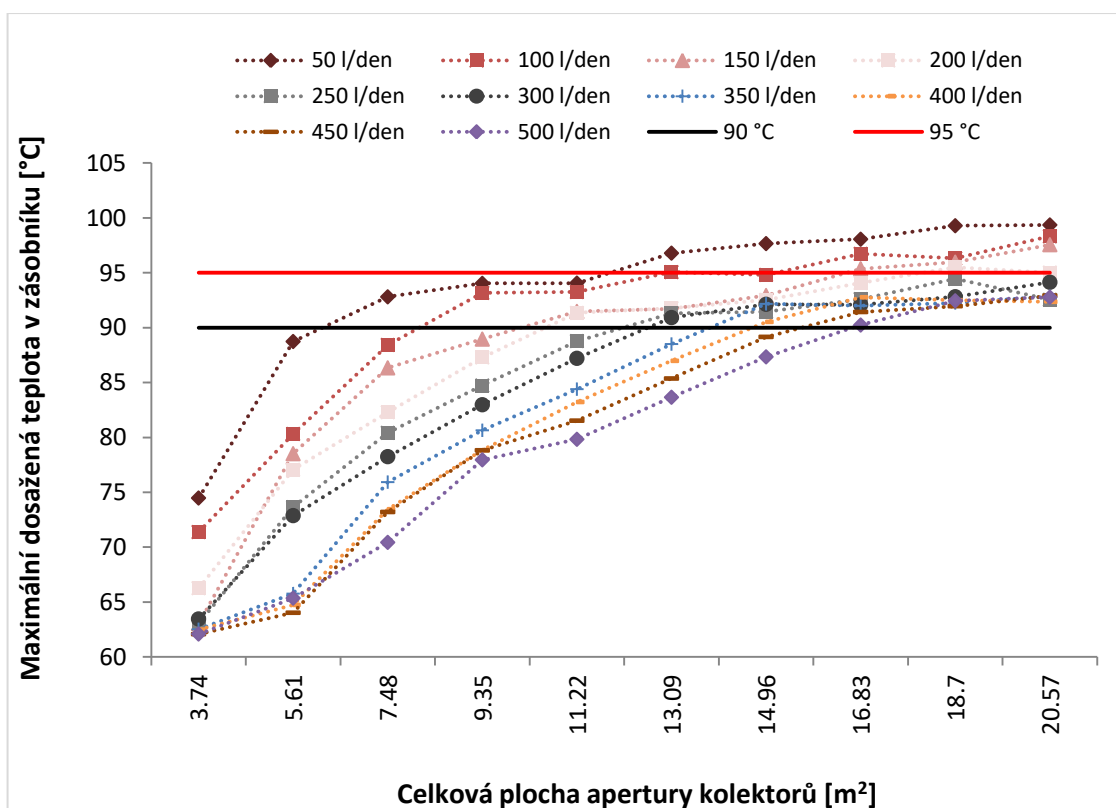


Graf 18: Tepelná bilance zásobníku tepla – 400 l





Graf 19: Tepelná ztráta vztažená na 1 liter objemu solárního zásobníku – 400 l



Graf 20: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 400 l

## Příloha 6: Zásobník 500 l

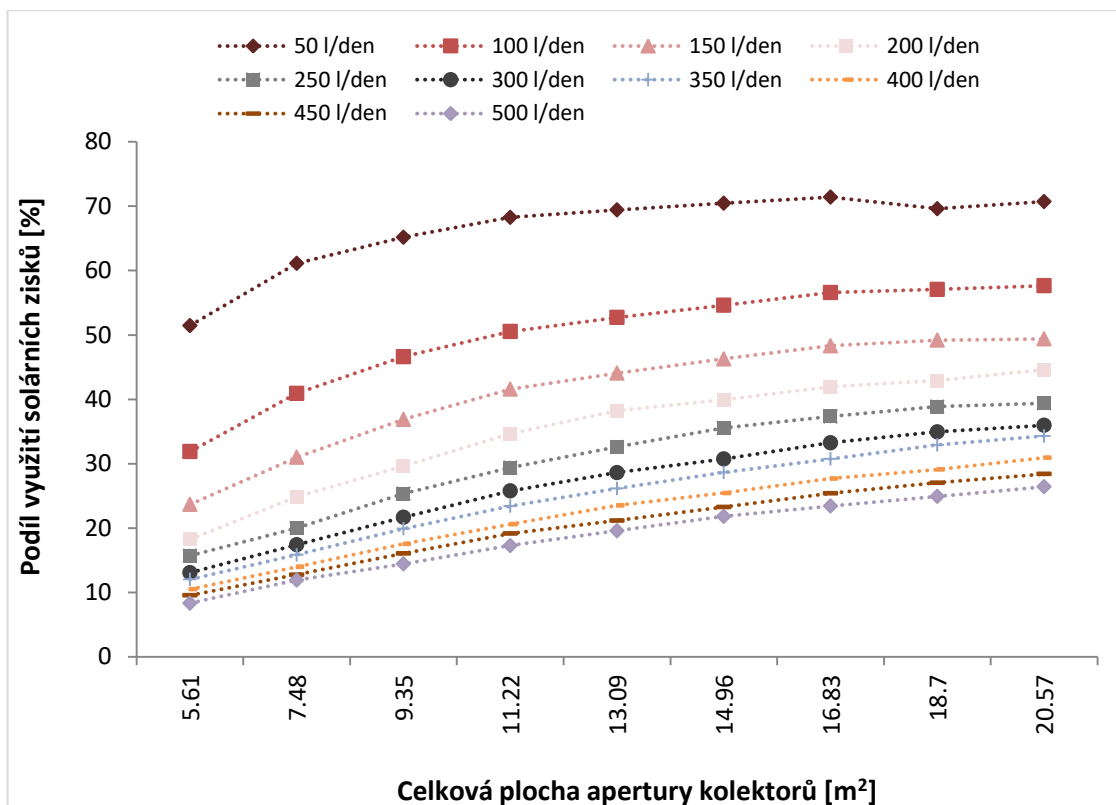
	500 l	
<b>Objem zásobníku</b>	472	l
<b>Výška zásobníku</b>	1.890	m
<b>Průměr zásobníku</b>	0.800	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.160	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.740	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg·K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.338	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m·K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	1.360	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.605	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0272	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0337	m
<b>Plocha výměníku</b>	2.000	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	18.891	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m·K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.660	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.200	m

Graf 21: Roční podíl využití solárních zisků – 500 l

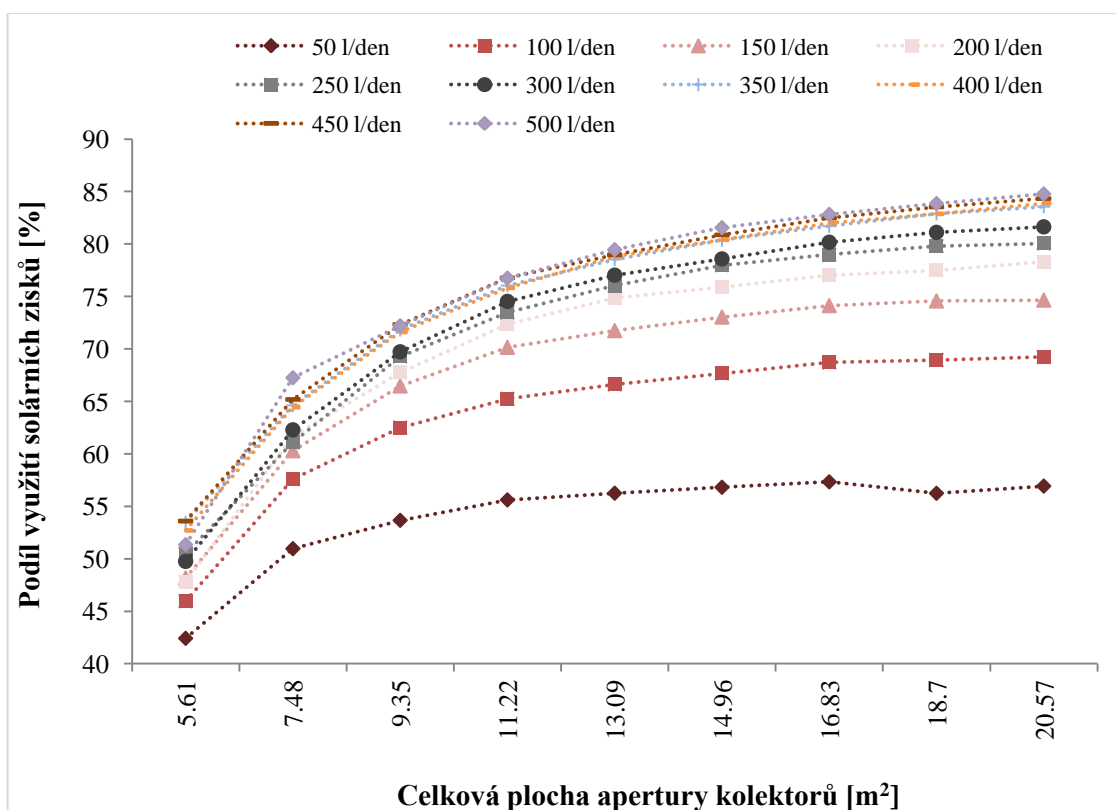
Graf 22: Tepelná bilance zásobníku tepla – 500 l

Graf 23: Tepelná ztráta zásobníku vztažená na 1 l objemu ohřívané kapaliny – 500 l

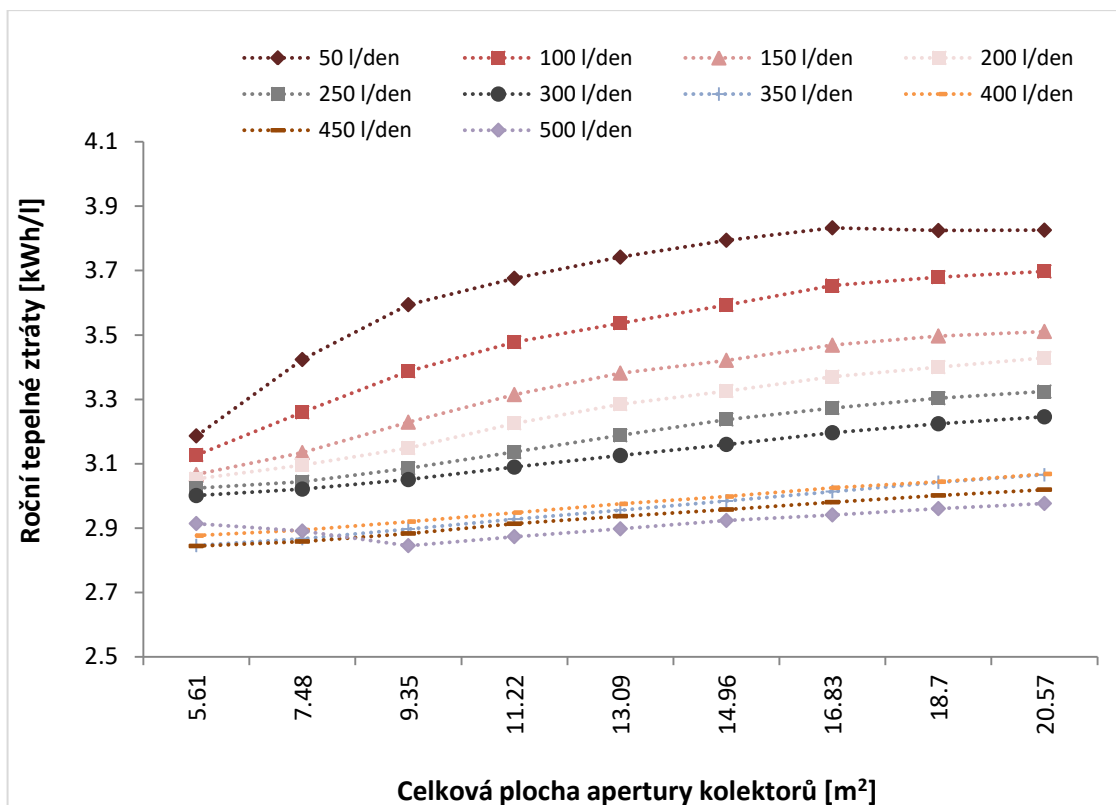
Graf 24: Nejvyšší dosažená teplota ohřívané kapaliny v solárním zásobníku – 500 l



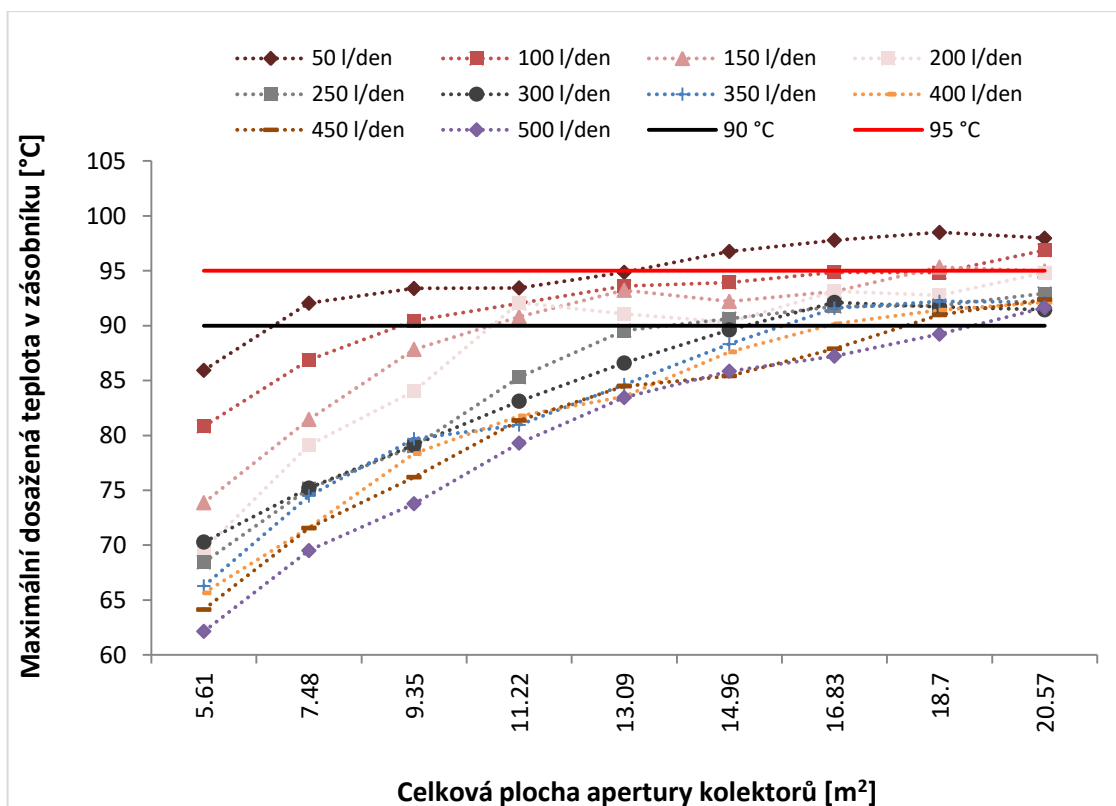
Graf 21: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 500 l



Graf 22: Tepelná bilance zásobníku tepla – 500 l



Graf 23: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 500 l



Graf 24: Nejvyšší dosažená teplota ohříváné kapaliny v solárním zásobníku – 500 l

## Příloha 7: Zásobník 600 l

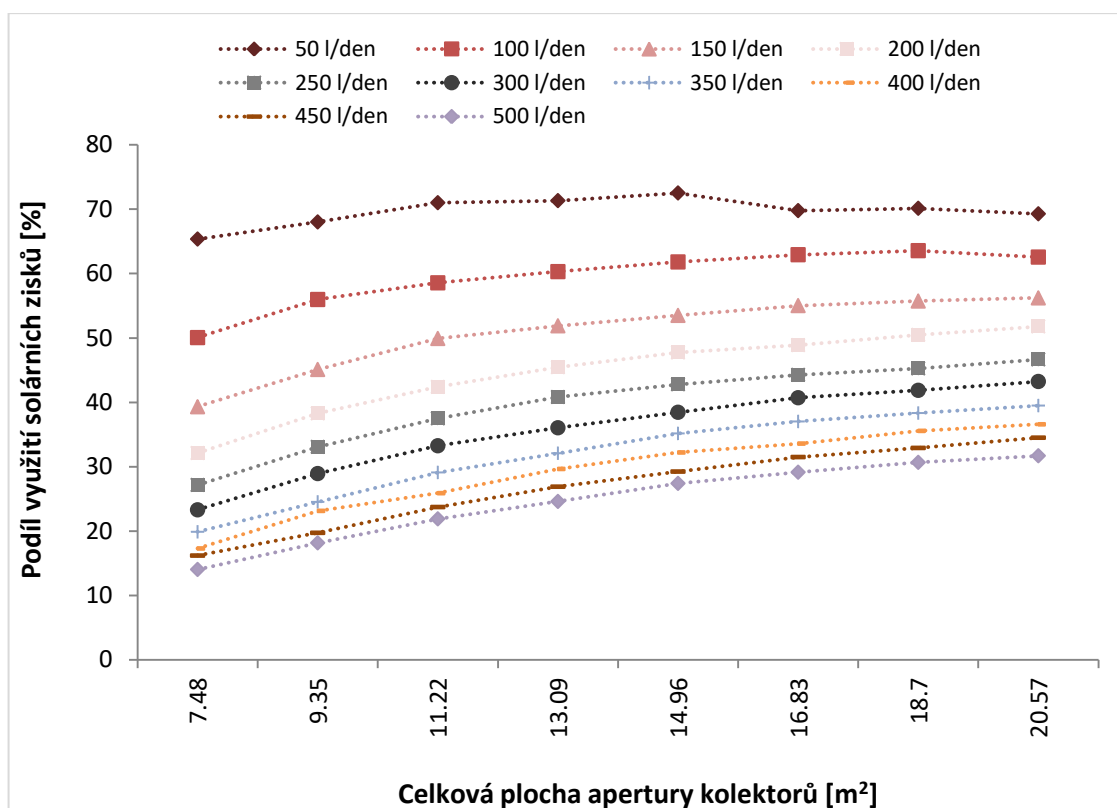
	600 l	
<b>Objem zásobníku</b>	564	l
<b>Výška zásobníku</b>	1.998	m
<b>Průměr zásobníku</b>	0.910	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.160	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.848	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg·K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.290	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m·K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	1.380	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.625	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0272	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0337	m
<b>Plocha výměníku</b>	2.200	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	20.780	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m·K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.660	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.200	m

Graf 25: Roční podíl využití solárních zisků – 600 l

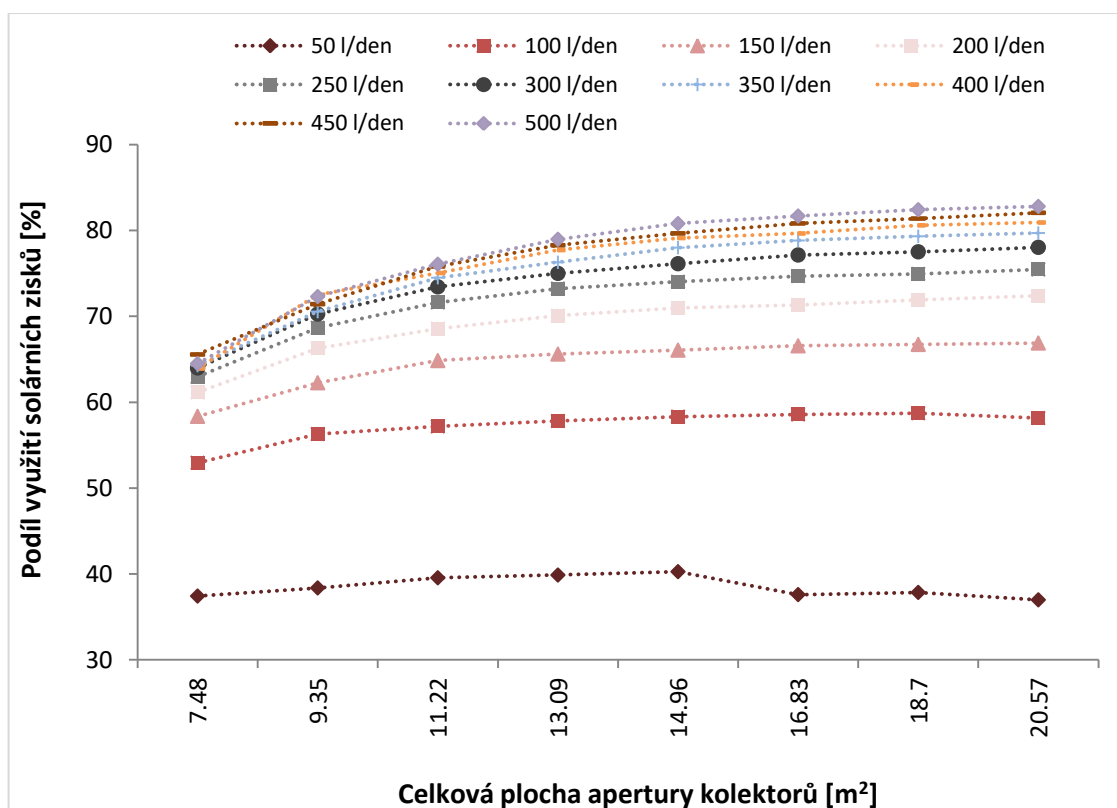
Graf 26: Tepelná bilance zásobníku tepla – 600 l

Graf 27: Tepelná ztráta zásobníku vztažená na 1 l objemu ohřívané kapaliny – 600 l

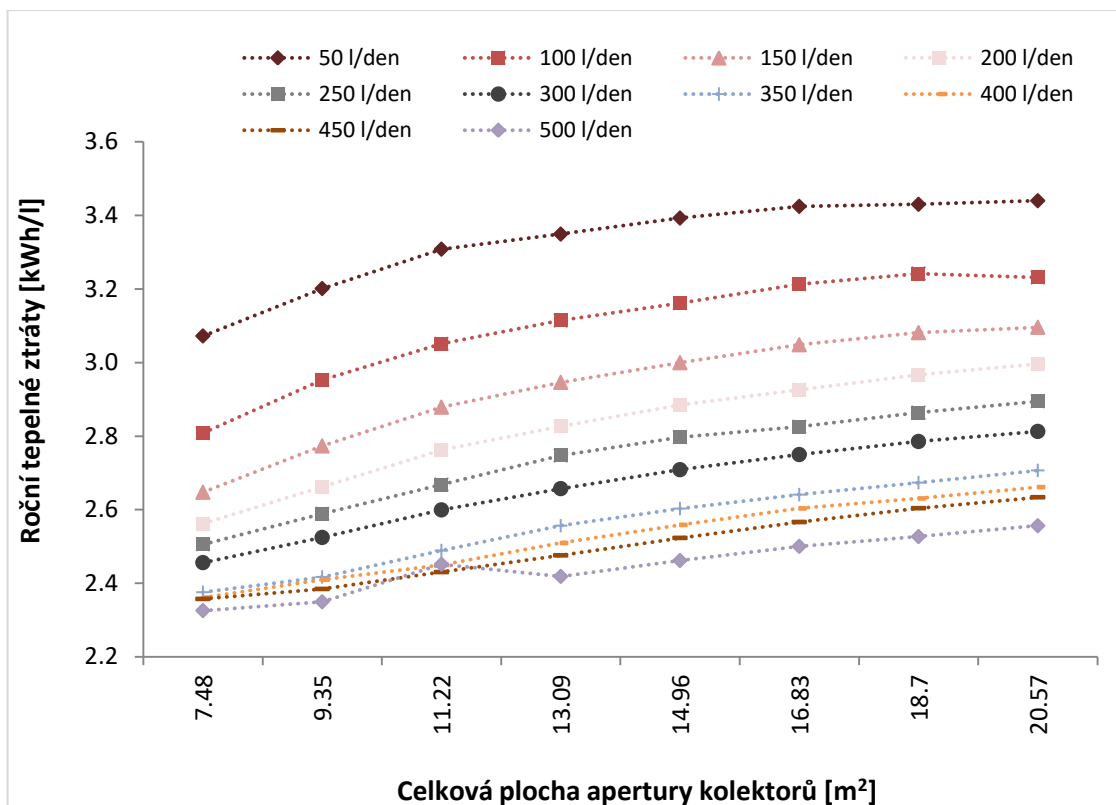
Graf 28: Nejvyšší dosažená teplota ohřívané kapaliny v solárním zásobníku – 600 l



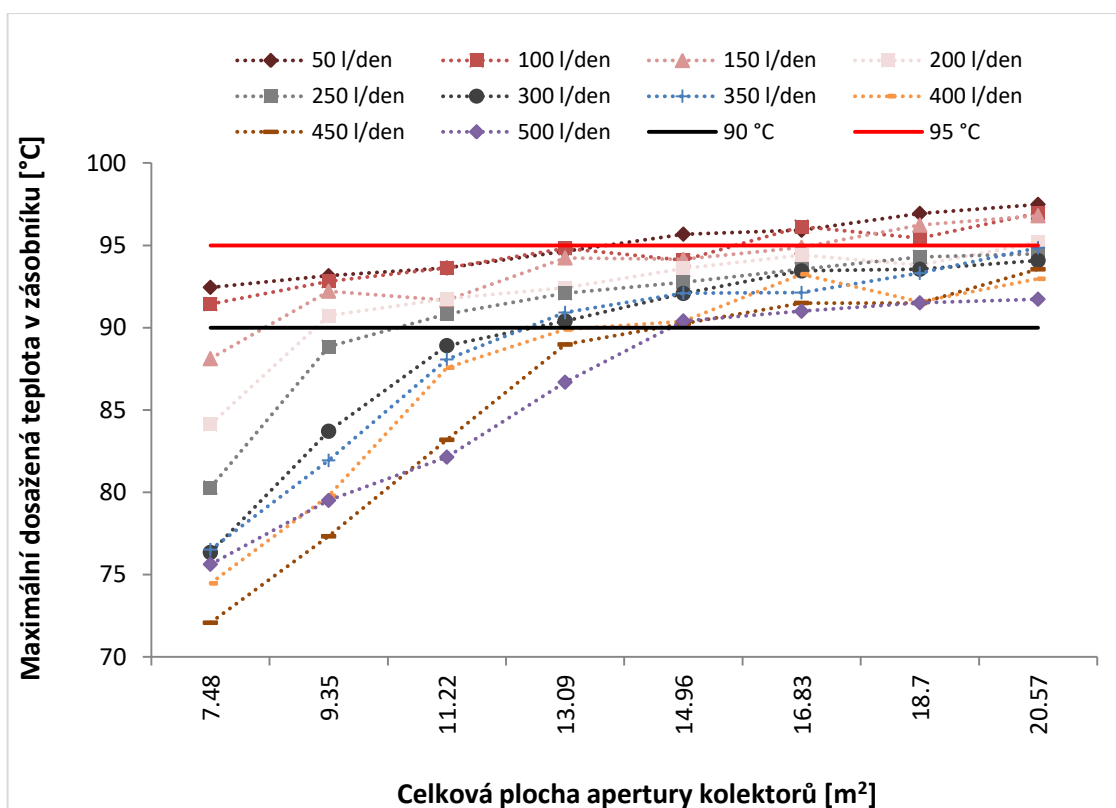
Graf 25: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 600 l



Graf 26: Tepelná bilance zásobníku tepla – 600 l



Graf 27: Tepelná ztráta vztažená na 1 liter objemu solárního zásobníku – 600 l



Graf 28: Nejvyšší dosažená teplota ohříváné kapaliny v solárním zásobníku – 600 l

## Příloha 8: Zásobník 750 l

	750 l	
<b>Objem zásobníku</b>	712	l
<b>Výška zásobníku</b>	1.870	m
<b>Průměr zásobníku</b>	0.950	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.160	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.720	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg·K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.298	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m·K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	1.380	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.625	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0359	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0424	m
<b>Plocha výměníku</b>	2.400	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	18.018	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m·K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.845	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.290	m

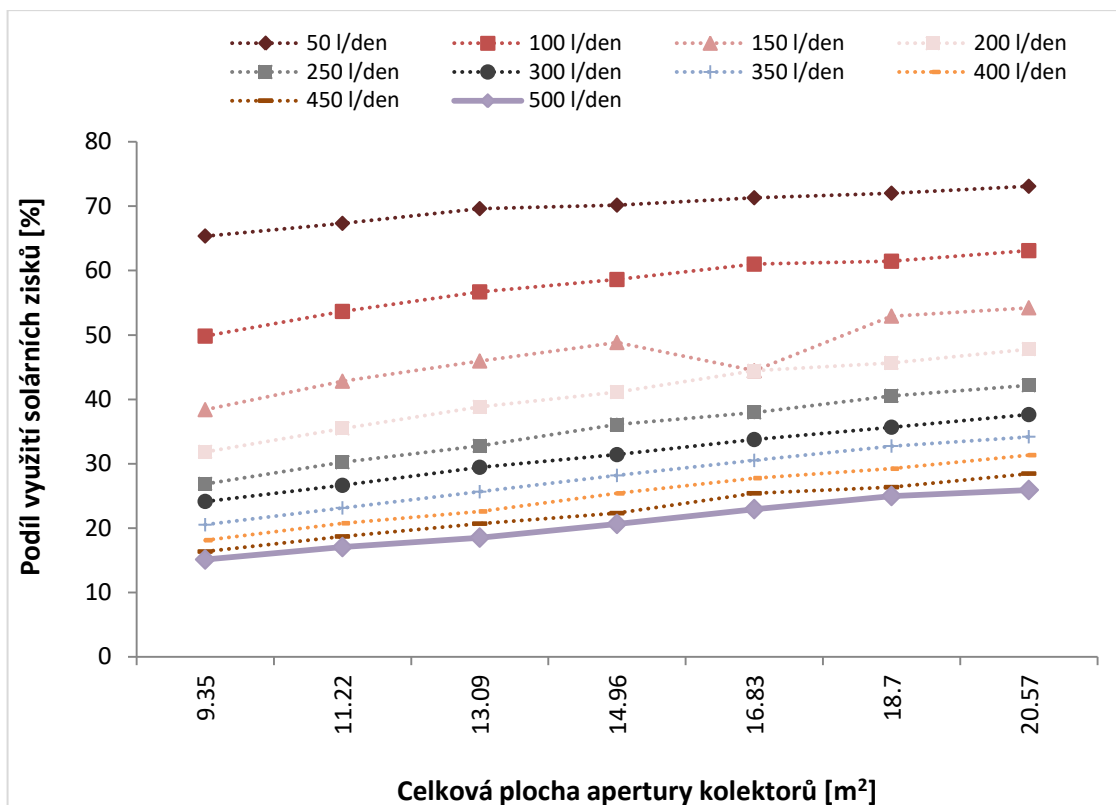
Graf 29: Roční podíl využití solárních zisků – 750 l

Graf 30: Tepelná bilance zásobníku tepla – 750 l

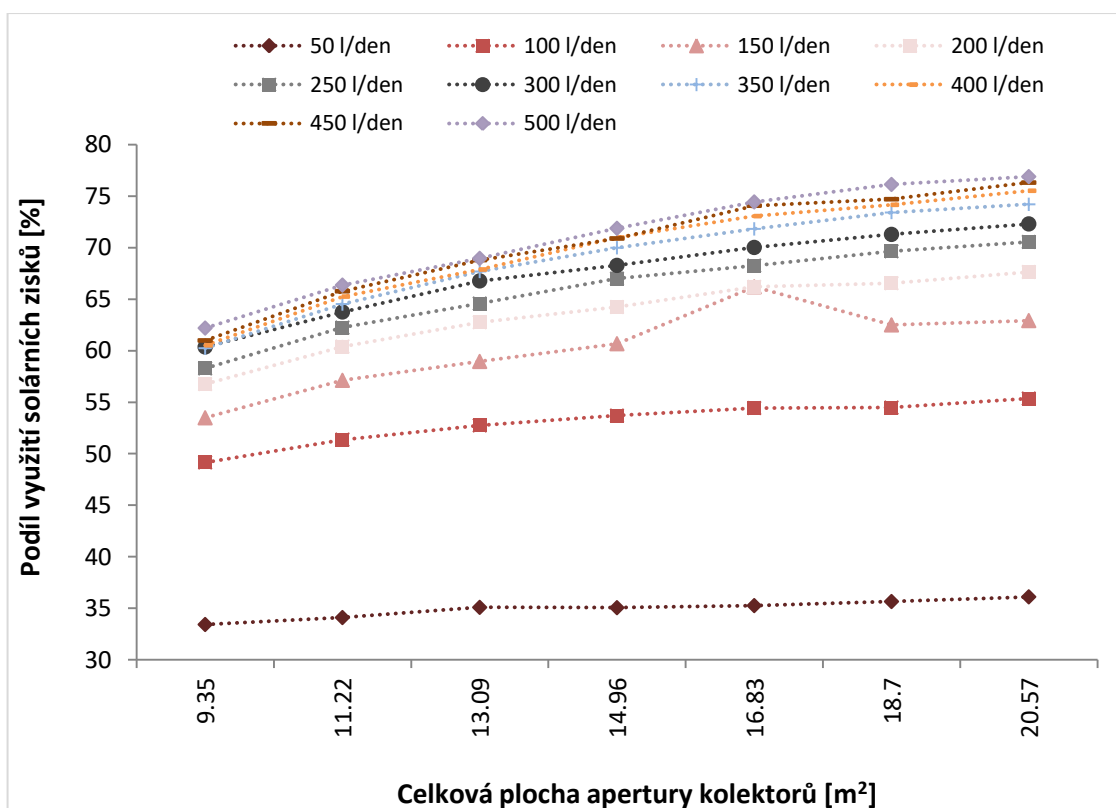
Graf 31: Tepelná ztráta zásobníku vztažená na 1 l objemu ohřívané kapaliny – 750 l

Graf 32: Nejvyšší dosažená teplota ohřívané kapaliny v solárním zásobníku – 750 l

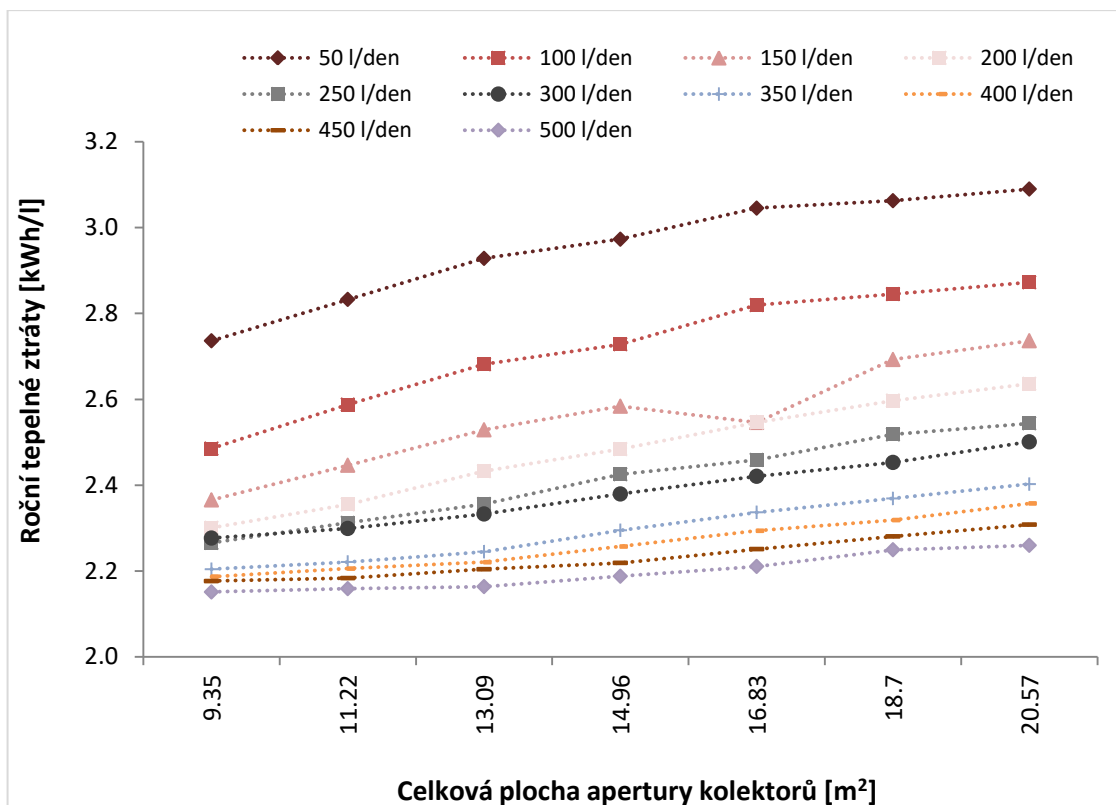




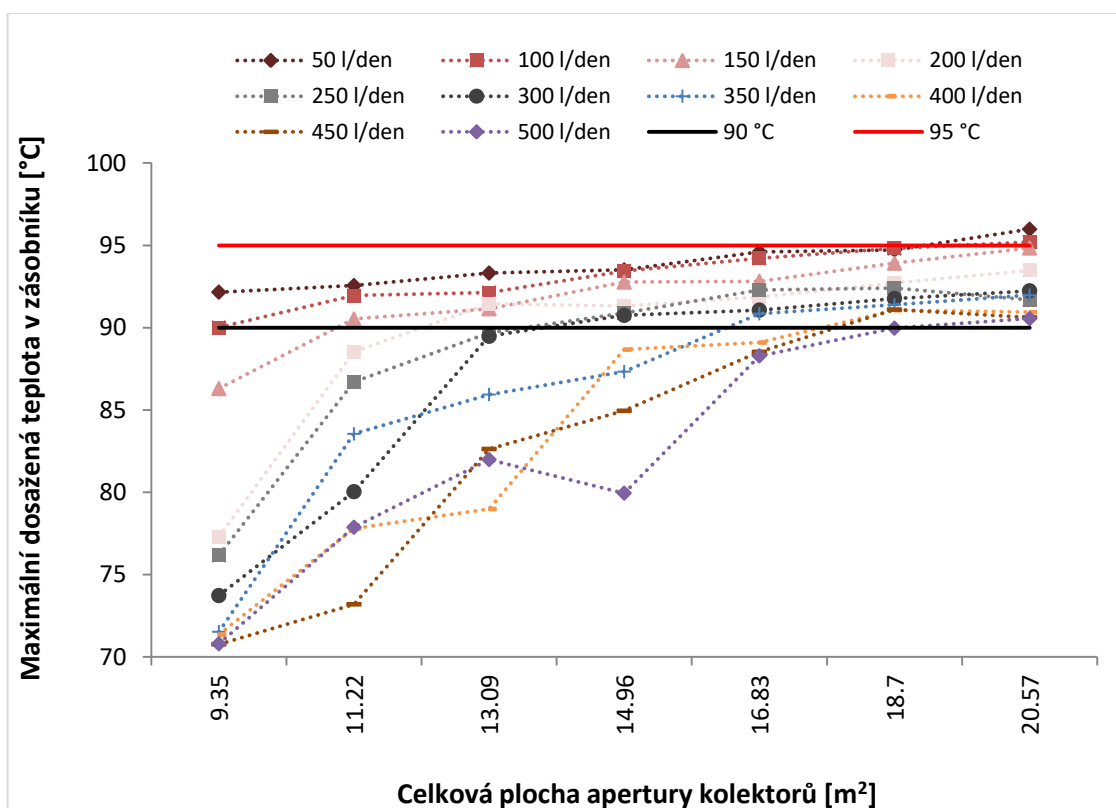
Graf 29: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 750 l



Graf 30: Tepelná bilance zásobníku tepla – 750 l



Graf 31: Tepelná ztráta vztažená na 1 liter objemu solárního zásobníku – 750 l



Graf 32: Nejvyšší dosažená teplota ohřívání kapaliny v solárním zásobníku – 750 l

## Příloha 9: Zásobník 800 l

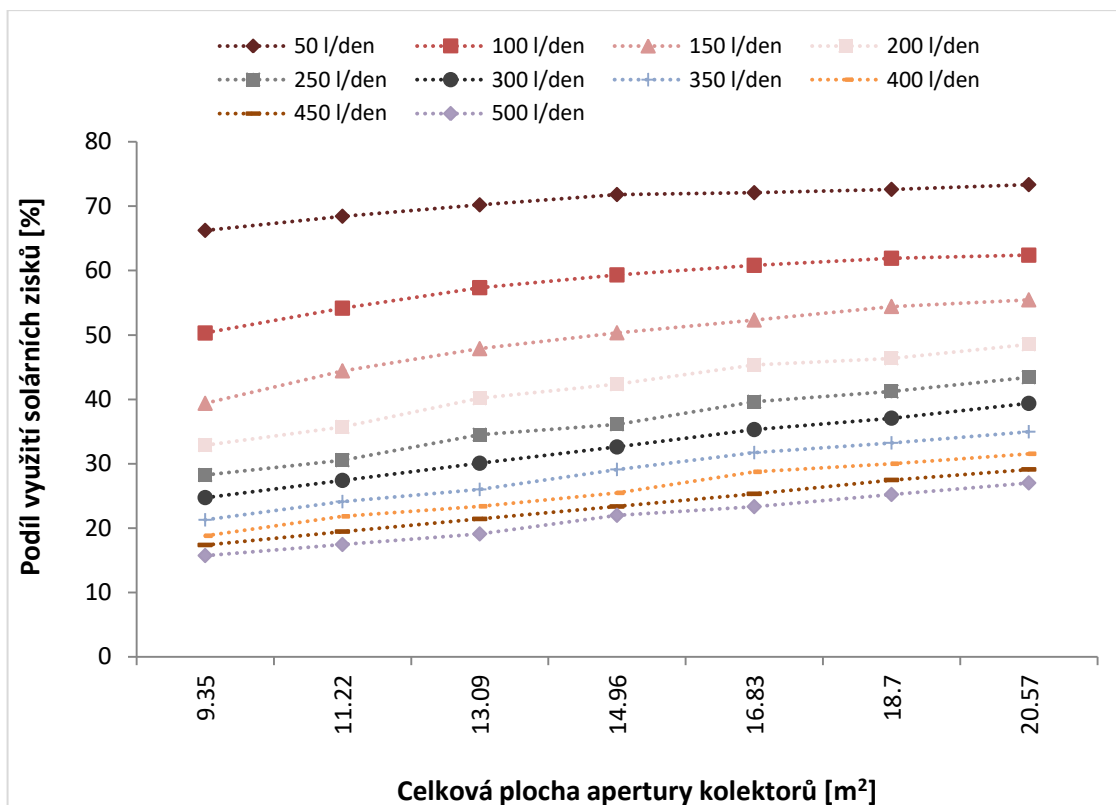
	800 l	
<b>Objem zásobníku</b>	807	l
<b>Výška zásobníku</b>	1.820	m
<b>Průměr zásobníku</b>	1.000	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.160	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.670	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg·K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.292	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m·K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	1.210	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.445	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0359	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0424	m
<b>Plocha výměníku</b>	2.700	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	20.270	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m·K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.845	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.290	m

Graf 33: Roční podíl využití solárních zisků – 800 l

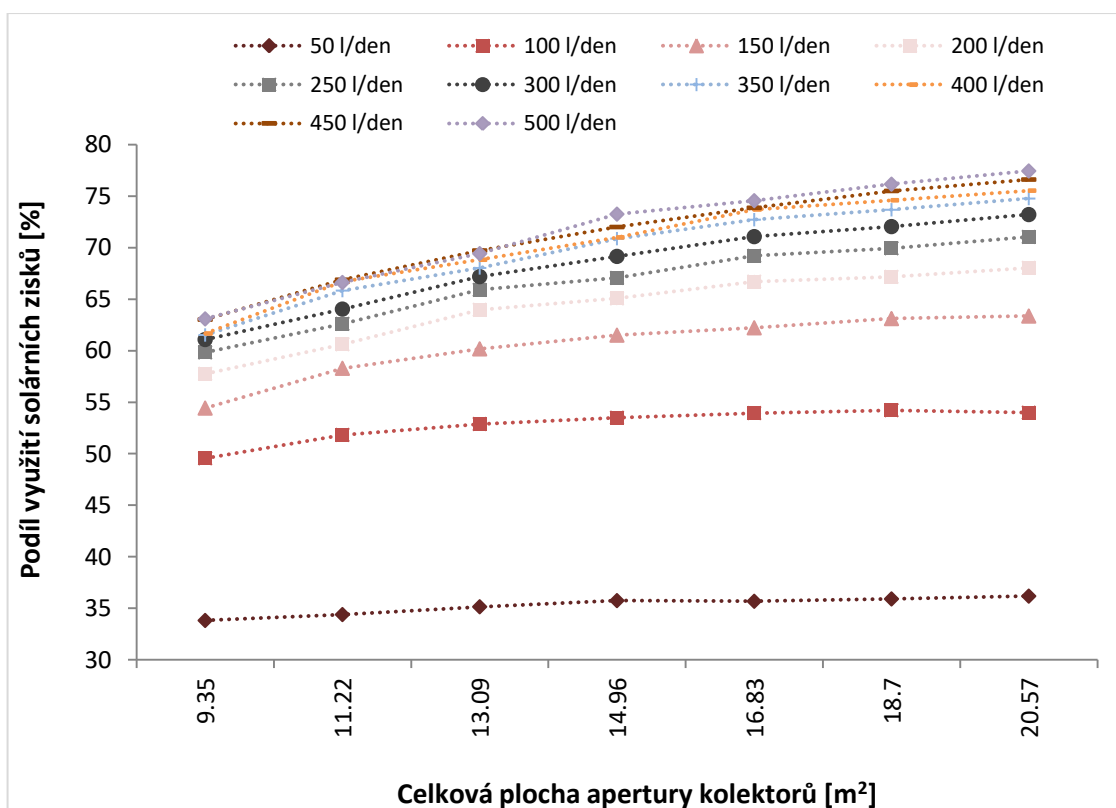
Graf 34: Tepelná bilance zásobníku tepla – 800 l

Graf 35: Tepelná ztráta zásobníku vztažená na 1 l objemu ohřívané kapaliny – 800 l

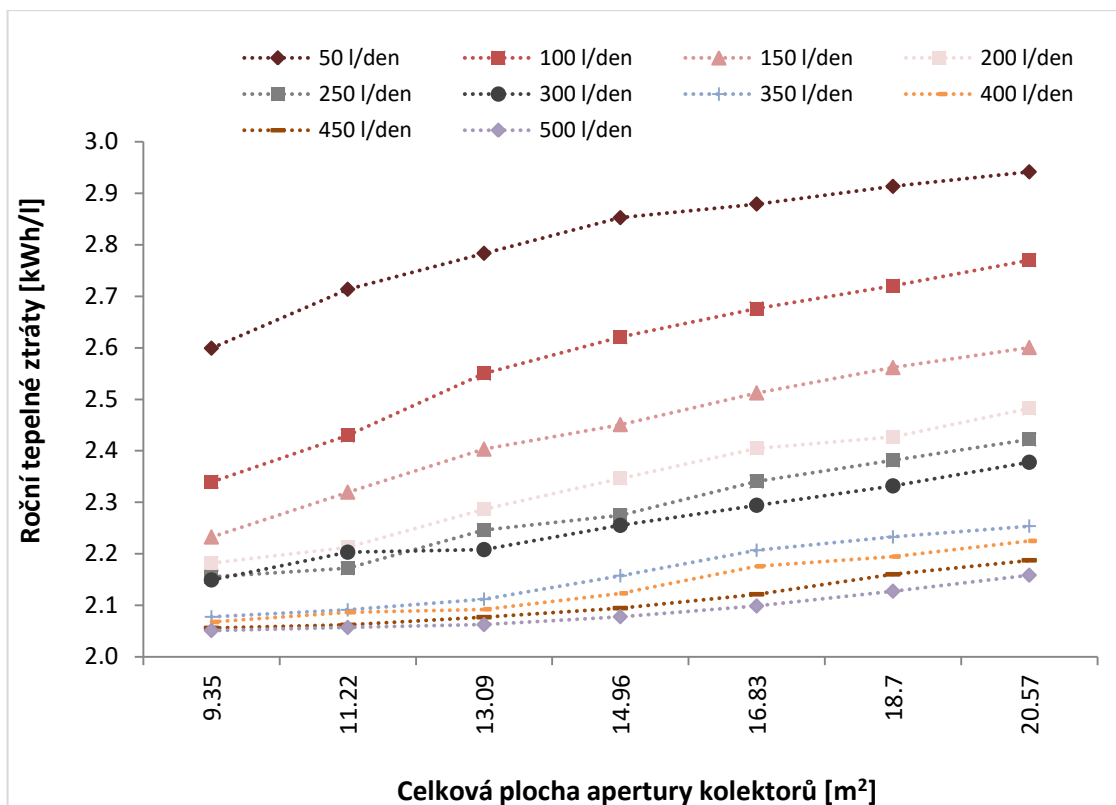
Graf 36: Nejvyšší dosažená teplota ohřívané kapaliny v solárním zásobníku – 800 l



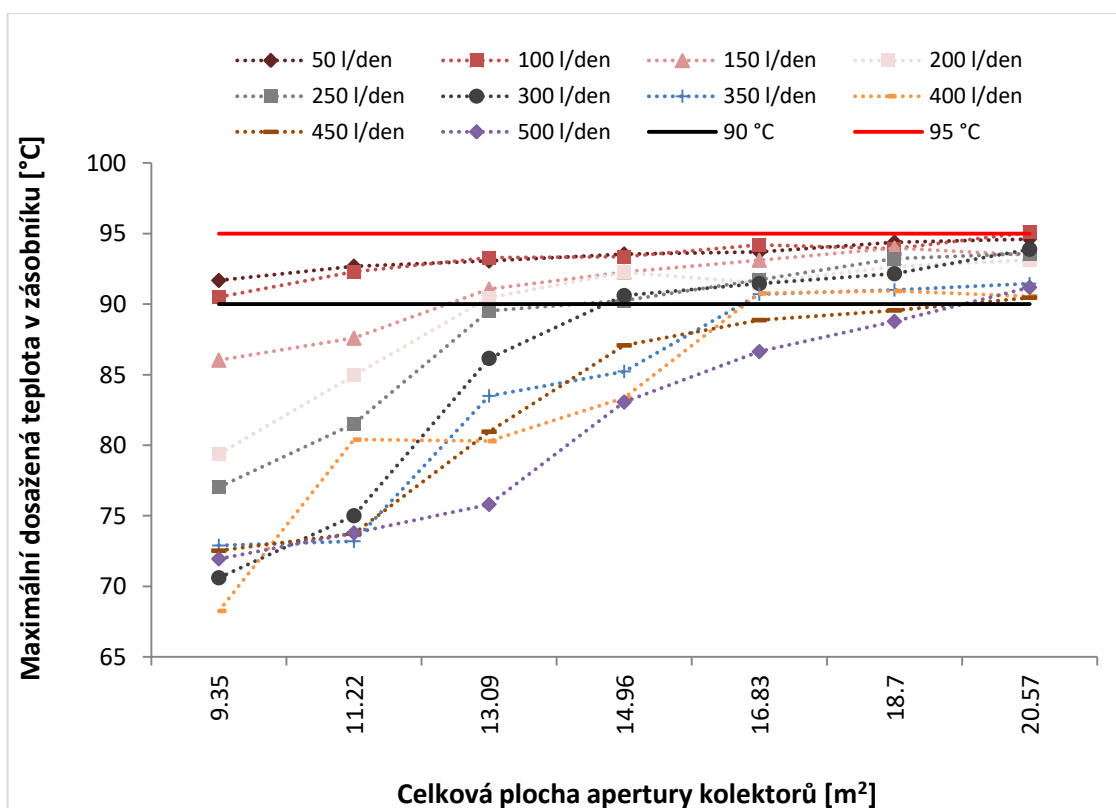
Graf 33: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 800 l



Graf 34: Tepelná bilance zásobníku tepla – 800 l



Graf 35: Tepelná ztráta vztažená na 1 liter objemu solárního zásobníku – 800 l



Graf 36: Nejvyšší dosažená teplota ohříváné kapaliny v solárním zásobníku – 800 l

## Příloha 10: Zásobník 1000 l

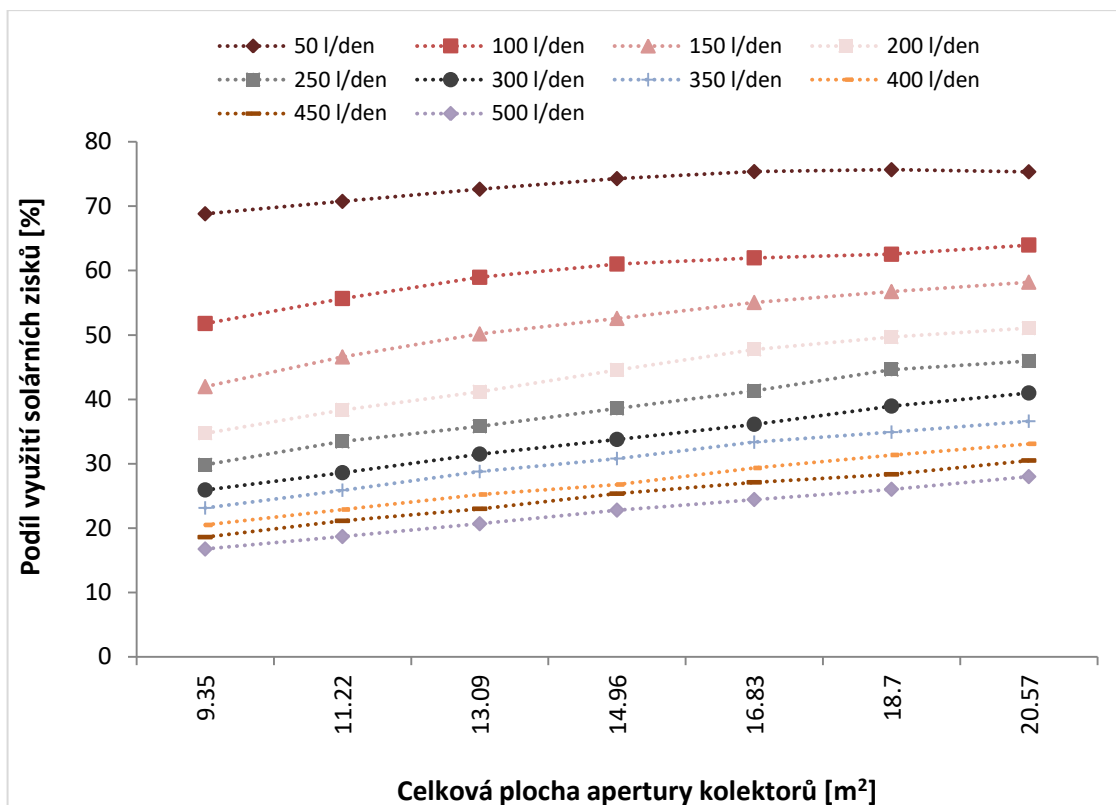
	<b>1000 l</b>	
<b>Objem zásobníku</b>	930	l
<b>Výška zásobníku</b>	2.070	m
<b>Průměr zásobníku</b>	1.000	m
<b>Pozice vstupu SV</b>	0.160	m
<b>Pozice výstupu TV</b>	1.920	m
<b>Tepelná kapacita vody</b>	4180	J/(kg·K)
<b>Hustota vody</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>Součinitel prostupu tepla</b>	0.275	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Vodivost kapaliny</b>	0.38	W/(m·K)
<b>Pozice el. topného tělesa</b>	1.450	m
<b>Pozice termostatu</b>	1.695	m
<b>Max. výkon el. topného tělesa</b>	3.0	kW
<b>Vnitřní průměr výměníku</b>	0.0359	m
<b>Vnější průměr výměníku</b>	0.0424	m
<b>Plocha výměníku</b>	3.200	m <sup>2</sup>
<b>Délka výměníku</b>	24.023	m
<b>Vodivost stěny výměníku</b>	386	W/(m·K)
<b>Pozice vstupu výměníku</b>	0.939	m
<b>Pozice výstupu výměníku</b>	0.290	m

Graf 37: Roční podíl využití solárních zisků – 1000 l

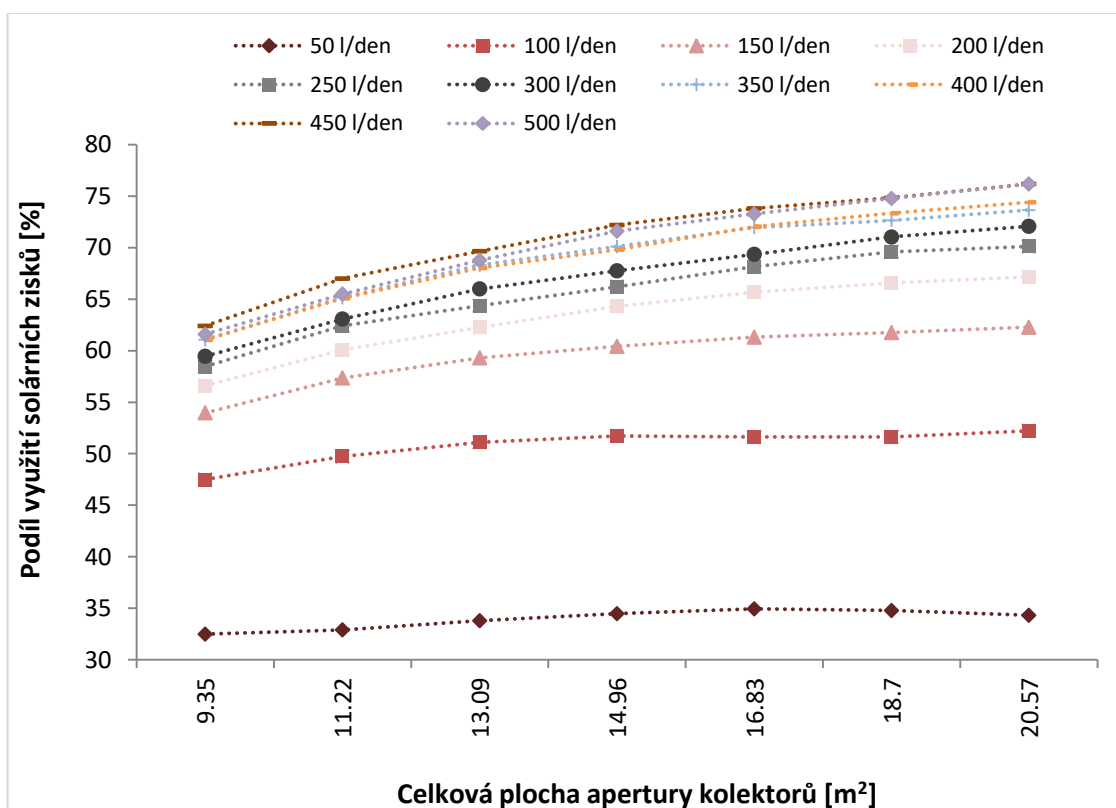
Graf 38: Tepelná bilance zásobníku tepla – 1000 l

Graf 39: Tepelná ztráta zásobníku vztažená na 1 litr objemu ohřívané kapaliny – 1000 l

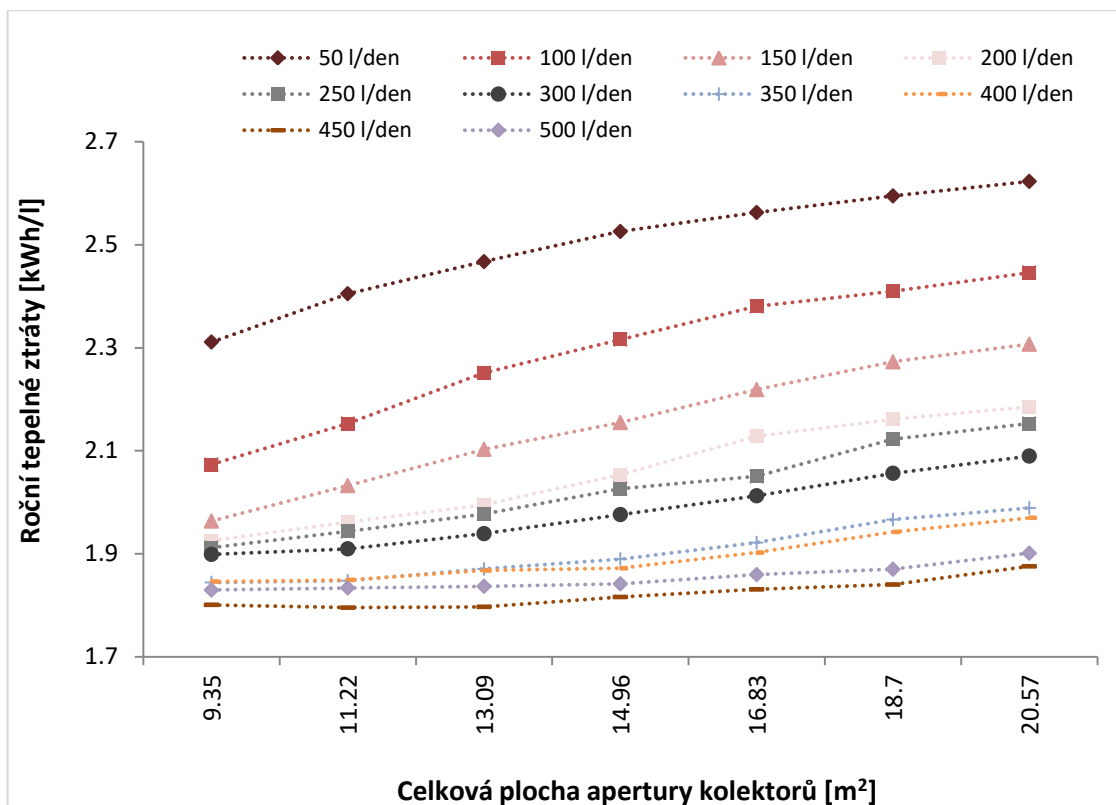
Graf 40: Nejvyšší dosažená teplota ohřívané kapaliny v solárním zásobníku – 1000 l



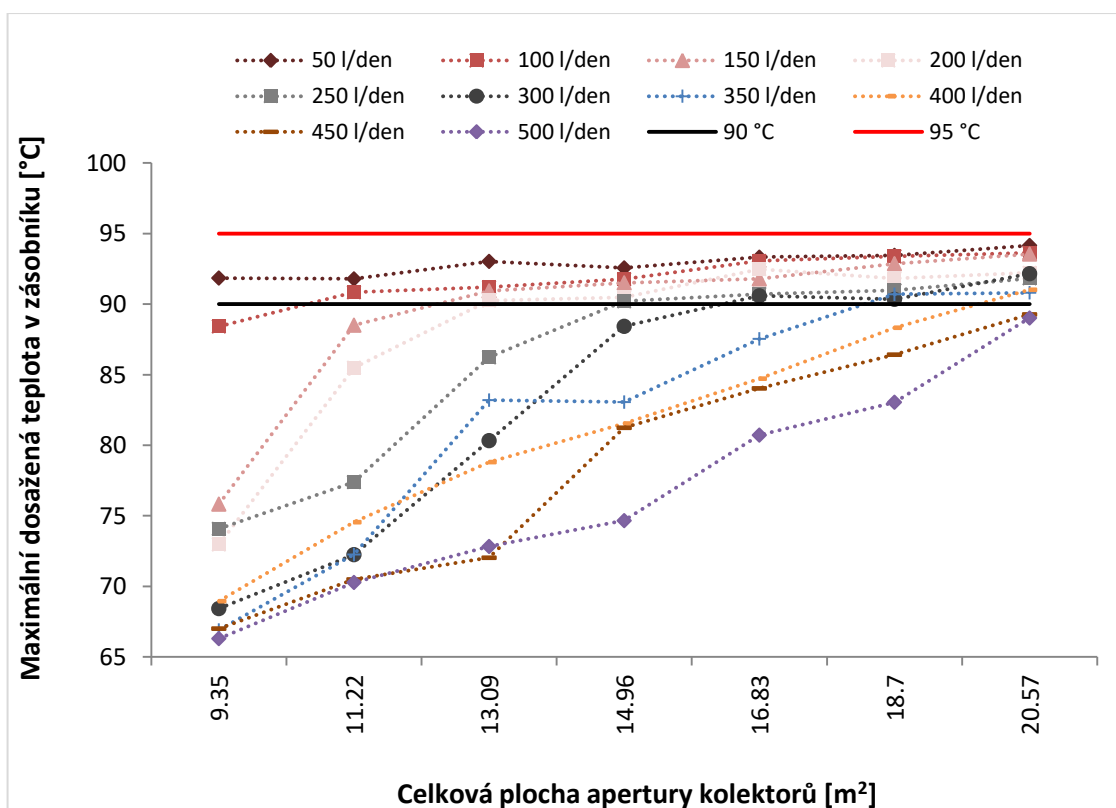
Graf 37: Podíl solárních zisků z celkové potřeby – 1000 l



Graf 38: Tepelná bilance zásobníku tepla – 1000 l



Graf 39: Tepelná ztráta vztažená na 1 litr objemu solárního zásobníku – 1000 l



Graf 40: Nejvyšší dosažená teplota ohříváné kapaliny v solárním zásobníku – 1000 l